

PAULO RAMOS REINALDO

**INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE PROCESSAMENTO POR PTA
E DO SUBSTRATO, NA RESISTÊNCIA AO DESGASTE DE UM
REVESTIMENTO A BASE DE Ni**

CURITIBA

2008

PAULO RAMOS REINALDO

**INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE PROCESSAMENTO POR PTA
E DO SUBSTRATO, NA RESISTÊNCIA AO DESGASTE DE UM
REVESTIMENTO A BASE DE Ni**

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia e Ciências dos Materiais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia – PIPE. Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dra. Ana Sofia Clímaco M. D'Oliveira

CURITIBA

2008

DEDICATÓRIA

A Deus Pai, Deus Filho e Deus Espírito Santo.

A Maria, Mãe de Deus e nossa.

*A minha esposa, Raquel e as minhas filhas,
Ana e Alessandra, pelo amor e compreensão.*

A Minha mãe, Iracema que está no céu.

A meu pai, que é Padre, pelas orações.

A meu irmão, Humberto pelo incentivo.

AGRADECIMENTOS

- Agradeço à Prof. Dra. Ana Sofia Clímaco M. D'Oliveira, pela paciência e orientação.
- Ao Professor Dr. Ramón Sigifredo Cortés Paredes, pois foi com quem mais matérias do Mestrado cursei e com quem muito aprendi.
- Aos amigos, Ricardo Adriano dos Santos, Cristiano Brunetti, João Junior Tigrinho, Gismar Schilive e Feliciano Cangue por me ajudarem no Mestrado e pelo apoio.
- Ao PIPE e à UFPR, pela oportunidade.
- A todos os professores, desde os da minha infância, até os do Mestrado.
- Ao pessoal que fez a deposição do PTA, engenheiro Edson Takano, e ao estudante de engenharia, Douglas Queiroz.
- Ao bolsista, Daniel, pela ajuda no uso de softwares.
- Ao ex-bolsista, Tiago, pela ajuda no trabalho com imagens.
- Ao LAMIR, ao Professor José Manoel, por permitir proceder às difrações, e ao Geólogo Rodrigo Secchi, por fazer e me ajudar a interpretar os resultados.
- Ao pessoal do MEV, Regina e Fernando, pela contribuição com as imagens da microestrutura.
- Ao Valter da Vistec.
- A todos os que me deram seu apoio, tais como: Jonas, Verônica, Karin, Gessica, Gustavo, Cheng, Guimarães.
- Aos amigos e amigas, que sempre me dão sua força e estão sempre ao meu lado contribuindo para que eu seja uma pessoa melhor entre as quais posso citar: Andressa, Luís, Gorreti, Nicole, Raimundo, Fabiane, Nara, Marcelo e Sandro.

EPÍGRAFE

“Regra de ouro”:

“Tudo, portanto, quanto desejais que os outros vos façam, fazei-o, vós também, a eles”. Mateus 7:12

Bíblia Sagrada

RESUMO

Na indústria petroquímica, Termoelétrica, naval, dentre outras, existe a necessidade crescente de substituir ou proteger componentes através de materiais que tenham desempenho superior, a fim de atender as mais exigentes condições de serviço. Dentre esses materiais, as Superligas à base de Ni são amplamente utilizadas devido às suas excelentes propriedades físicas e mecânicas e também porque podem ser empregadas como revestimentos. A liga à base de Ni, Colmonoy 6 é reconhecida por suas propriedades mecânicas superiores comparada com outras superligas à base de Ni, pela presença de dispersão de duros boretos e carbetos numa matriz tenaz de Ni. Este estudo teve por objetivo avaliar o efeito dos parâmetros de processamento sobre o desempenho ao desgaste por deslizamento abrasivo do revestimento da liga à base de Ni, a Colmonoy 6. A liga de Ni atomizada foi depositada pelo processo Plasma a Arco Transferido sobre dois substratos: aço carbono AISI 1020 e aço inoxidável AISI 304, com duas correntes, 130A e 170A e duas velocidades de avanço, 5 e 20cm/min. O processo escolhido para esta finalidade foi o Plasma Arco Transferido (PTA) devido suas vantagens em relação a outros processos de soldagem tais como: a estabilidade direcional e focal do arco, baixa diluição, baixa distorção e a superior qualidade do revestimento. Os revestimentos foram avaliados através da caracterização do acabamento superficial, da geometria dos cordões de solda, da microdureza Vickers, diluição, análise da microestrutura e resistência ao desgaste por deslizamento abrasivo. Os resultados demonstraram uma significativa influência dos parâmetros de processamento e da composição química do substrato na resistência ao desgaste por deslizamento abrasivo dos revestimentos da Colmonoy 6. Depósitos processados com a maior corrente, 170A, apresentaram maior perda de massa. Enquanto, aqueles processados com corrente de 130A e uma velocidade de 5cm/min resultaram em menor perda massa, associada com a microestrutura dos revestimentos que melhor preserva as características da liga atomizada depositada. Para os mesmos parâmetros de processamento, a utilização do substrato o AISI 304 apresentaram revestimentos com menor resistência ao desgaste. No entanto, a comparação entre revestimentos com o mesmo nível de dureza mostra que depósitos processados sobre o aço inox AISI 304 possuem um superior desempenho em relação aos exibidos por revestimentos processados sobre o aço carbono AISI 1020. Comportamento associado ao menor impacto do aço inoxidável sobre as propriedades da liga depositada.

Palavras-chave: desgaste, liga de Ni, condutividade térmica, Plasma a Arco Transferido.

ABSTRACT

In Petrochemical, Thermo-power, Naval Industry, among others, there is a increasing need to replace or to protect components with materials that have a superior performance in order to attend the more demanding service conditions. Among these materials , Ni based Superalloys are widely used due to their excellent physical and mechanical properties and also since they can be used as coatings. The Ni based alloy, Colmonoy 6 is known for its superior mechanic properties compared to other Ni based superalloys, associated with the presence of a dispersion of hard borides and carbides in a tough Ni based matrix. This study aimed at evaluating the effect of processing parameters on the *abrasive sliding wear performance* of the Ni based alloy coating, Colmonoy 6. The atomized Ni alloy was deposited by the Plasma Transferred Arc process on two substrates: AISI 1020 carbon steel and AISI 304 stainless steel, using two currents, 130A and 170A and two scanning velocities, 5 and 20cm/min. Plasma Transferred Arc (PTA) process was selected due to its advantages over other welding process such as, directional and focal stability of the plasma arc, low dilution, low distortion and to the superior finishing quality of the coatings. The coatings characteristics were evaluated by superficial finishing characterization, geometry of the weld fillets, Vickers microhardness, dilution, microstructure analysis and *abrasive sliding wear resistance*. Results showed a significant influence of the processing parameters and of the substrate chemical composition on the *abrasive sliding wear resistance* of the Colmonoy 6 coatings. Deposits processed with the higher current, 170A, presented the higher mass loss. Whereas, those processed with current of 130A and a velocity of 5cm/min resulted in smaller mass losses, associated with the microstructure of the coatings that better preserved the characteristics of the deposited atomized alloy. Under the same processing conditions deposition on AISI 304 stainless steel substrates resulted in coatings with lower resistance to wear. However, the *comparison between coatings with the same hardness showed that deposits processed on AISI 304 stainless steel exhibited a superior performance to that of coatings processed on AISI 1020 carbon steel. Behaviour associated with the lower impact of the stainless steel on the properties of the deposited Ni alloy.*

Keywords: wear, alloy of Ni, thermal conductivity, Plasma Transferred Arc.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Representação esquemática do processo Plasma a Arco Transferido(PTA), apresentando o arco piloto.....	16
Figura 2.2 – Representação esquemática dos processos de TIG e PTA (BRACARENSE, 2000).	17
Figura 2.3 – Formato dos arcos nos processos de soldagem TIG e Plasma a Arco Transferido.	18
Figura 2.4 – Tipos de arcos no processo de soldagem por PTA.....	19
Figura 2.5 – Definição da fração	28
Figura 3.4 – Diluição por técnica de soldagem.....	34
Figura 3.5 - Cordão de solda cortado transversalmente,através do plano BB. (a)	35
Figura 3.6 - Esquema da seqüência de indentações para levantamento do perfil de microdureza dos revestimentos.....	36
Figura 3.7 - Esquema mostrando as medidas da largura e o reforço e a penetração do cordão de solda.....	36
Figura 3.8 - Equipamento utilizado no ensaio de desgaste por deslizamento abrasivo desenvolvido no Lamats de acordo com a norma ASTM G99-95a	38
Figura 4.1 – Aspecto do cordão na soldagem por PTA, da liga Colmonoy 6. Com parâmetros de 130A e velocidade de deslocamento de 20cm/min. Como substrato o aço AISI 1020.....	40
Figura 4.2 – Aspecto do cordão na soldagem por PTA, da liga Colmonoy 6.Com parâmetros de 170A e velocidade de avanço de 20cm/min. Como substrato o aço AISI 1020.....	40
Figura 4.3 – Geometria da seção transversal dos revestimentos dos depósitos da Colmonoy 6 com corrente fixa de 130 A. a) 5 cm/min (b) 20 cm/min.	41
Figura 4.4 – Geometria da seção transversal dos revestimentos dos depósitos da Colmonoy 6 com corrente fixa de 170 A. a) 5 cm/min (b) 20 cm/min.	41
Figura 4.5 – Efeito da corrente e da velocidade nos valores da diluição dos revestimentos da Colmonoy 6 por PTA sobre o AISI 1020. a) 130 A; b) 170 A	45

Figura 4.6 – Perfil de microdureza Vickers de revestimentos da Colmonoy 6 por PTA, sobre metal base o aço AISI 1020 a) 130 e 170A - 5 cm/min; b) 130 A e 170A - 20 cm/min.....	47
Figura 4.7 – Microestruturas obtidas por microscopia ótica dos depósitos da Colmonoy 6 por PTA, processados com velocidade de 5 cm/min em substrato de aço AISI 1020. a) 130 A; b) 170 A.....	48
Figura 4.8 – Microestrutura obtida por microscopia eletrônica dos depósitos da Colmonoy 6 por PTA, processados com velocidade de 20 cm/min e corrente de 130A	49
Figura 4.9 – Difração de Raio X do revestimento da Colmonoy 6 por PTA, processado com corrente de 130A e velocidade de avanço de 20cm/min, sobre o AISI 1020.....	50
Figura 4.10 – Aspecto do cordão na soldagem por PTA da liga Colmonoy 6, com velocidade de avanço de 5 cm/min. a) 130 A; b) 170 A. Como substrato o aço AISI 304.....	51
Figura 4.11 – Corresponde ao corte transversal dos revestimentos da Colmonoy 6, por PTA, sobre o metal base o AISI 304 processados com velocidade de 5 cm/min. a) 130 A; b)170 A	53
Figura 4.12 – Corresponde ao corte transversal dos revestimentos da Colmonoy 6, por PTA, sobre o metal base o AISI 304, processados com velocidade de 20 cm/min. a) 130 A; b)170 A	53
Figura 4.13 – Efeito da corrente nos Valores da diluição dos revestimentos da Colmonoy 6 por PTA, sobre substrato de aço AISI 304, em função da velocidade. .	54
Figura 4.14 – Valores da Diluição para as correntes de 130A e 170A, dos revestimentos da Colmonoy 6, com os dois substratos, os aços AISI 1020 e aço AISI 304, em função da velocidade	55
Figura 4.15 – Valores de microdureza Vickers dos revestimentos da Colmonoy 6 por PTA, sobre os dois substratos para as correntes de 130A e 170A e para velocidade de 5cm/min.....	56
Figura 4.16 – Valores de microdureza Vickers dos revestimentos da Colmonoy 6 por PTA, sobre o os dois substratos para as correntes de 130A e 170A e para velocidade de20 cm/min.....	57

Figura 4.17 – Estrutura dendrítica dos revestimentos da liga colmonoy 6 por microscopia ótica. a) corrente de 170 A e Velocidade de avanço de 20 cm/min b) corrente de 170A e velocidade de 5cm/min. Substrato a aço AISI 304;.....	58
Figura 4.18 – Microestruturas obtidas por microscopia eletrônica, dos revestimentos da Colmonoy 6, processados com corrente de 130A, substrato o AISI 304. a) velocidade de 20cm/min; b) velocidade de 5cm/min.....	59
Figura 4.19 – Difração de raios-X dos revestimentos da Colmonoy 6 por PTA Com corrente de 130A e velocidade de 20cm/min, substrato o AISI 304.....	60
Figura 4.20 – Difração de raios-X dos revestimentos da Colmonoy 6 por PTA Com corrente de 130A e velocidade de 5cm/min, substrato o AISI 304.....	61
Figura 4.21 – Estrutura dendrítica do revestimento da Colmonoy 6 por microscopia eletrônica dos depósitos da Colmonoy 6, processados com velocidade de 20cm/min e intensidade de corrente de 170A. Substrato o AISI 304.....	62
Figura 4.22 – Difração de raios-X dos revestimentos da Colmonoy 6 por PTA, com corrente de 170A e velocidade de 20cm/min.....	63
Figura 4.23 – Difração de raios-X dos revestimentos da Colmonoy 6 por PTA, com corrente de 170A e velocidade de 5cm/min.....	64
Figura 4.24 – Perda de massa em gramas, dos revestimentos da Colmonoy 6, substrato o AISI 1020 e AISI 304, para um percurso de 5000 m e corrente de 170A num ensaio de desgaste por deslizamento abrasivo.....	68
Figura 4.25 – Perda de massa em gramas,dos revestimentos da Colmonoy 6, substrato o aço AISI 1020 e AISI 304 para um percurso de 5000m e corrente de 130A num ensaio por deslizamento abrasivo.....	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Composição química da superliga à base de Ni e dos substratos.....	32
Tabela 3.2 – Parâmetros de processamento.....	32
Tabela 3.3 – Parâmetros de processamento por PTA.....	33
Tabela 4.2 – Dimensões dos revestimentos obtidos com a mudança da intensidade de corrente, substrato o AISI 304	52
Tabela 4.3 – Valores da perda de massa e dureza dos revestimentos da Colmonoy 6, como substrato o AISI 1020.....	66
Tabela 4.4 – Valores da taxa de desgaste dos revestimentos da Colmonoy 6, como substrato o AISI 1020 e o AISI 304.....	67

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AISI – American iron and Steel Institute

CFC – Estrutura cristalina cúbica de face centrada

DEMEC – Departamento de Engenharia Mecânica

EDS – Energy Dispersive Scattering

HV – Dureza Vickers

I(A) - Unidade de intensidade de corrente elétrica o Ampère

Keyhole – Técnica de Soldagem a Plasma

LAMIR – Laboratório de Análises de Minerais e Rochas

MEV – Microscópio Eletrônico de Varredura

mg – Miligrama, milésima parte do grama

ml – Mililitro, milésima parte do litro

Ni – Símbolo químico do Níquel

PAW – Plasma Arc Welding: soldagem a arco plasma

PIPE – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais e Processos

PTA – Plasma a Arco Transferido : processo de soldagem a plasma

s – Segundo, unidade básica utilizada para medir o tempo

TIG – Tungsten inert *gas* – processo de soldagem a arco com eletrodo de tungstênio e gás

UFPR – Universidade Federal do Paraná

V – Velocidade de avanço da tocha a plasma em cm/min

LISTA DE SÍMBOLOS

γ' – $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$ fase ordenada coerente com matriz

γ'' – Ni_3Nb , fase com estrutura cristalina tetragonal de corpo centrado

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	15
2.1	Princípios de operação	15
2.1.1	Comparação entre TIG e PTA (efeitos da constrição do arco)	16
2.1.2	Tipos de arco	19
2.1.3	Vantagens do processo PTA.....	19
2.1.4	Desvantagens do processo PTA	20
2.1.5	Técnicas de soldagem	20
2.1.6	Aporte térmico.....	21
2.2	Ni e superligas à base de Ni	22
2.2.1	Liga de Ni, Colmonoy 6	26
2.3	Desgaste abrasivo	27
3	PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	31
3.1	Introdução.....	31
3.2	Materiais	31
3.3	Processamento.....	32
3.4	Caracterização dos revestimentos.....	33
3.4.1	Aspectos gerais.....	33
3.4.2	Diluição	33
3.4.3	Perfis de microdureza Vickers.....	35
3.4.4	Análise da microestrutura.....	36
3.4.5	Ensaio de desgaste por deslizamento.....	37
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
4.1	Efeito dos parâmetros de processamento.....	39
4.1.1	Microdureza	46
4.1.2	Microestrutura	47
4.2	Efeito do Substrato	51
4.2.1	Características gerais.....	51
4.2.2	Influência do substrato na dureza	55
4.2.3	Influência do substrato na microestrutura.....	57
4.3	Desempenho ao Desgaste	65
4.3.1	Influência dos parâmetros de processamento e efeito do substrato no desempenho ao desgaste.....	65
5	CONCLUSÕES.....	70
5.1	Conclusões.....	70
5.2	Sugestões para trabalhos futuros	71
	REFERÊNCIAS.....	72

1 INTRODUÇÃO

O desgaste é um fator de depreciação de capital na medida em que eleva os gastos com a manutenção e reposição de componentes mecânicos, podendo até conduzir a paradas imprevistas, com interrupção da produção.

A engenharia de superfície permite estudar diversas formas de se realizar a proteção de componentes expostos ao desgaste através da deposição de revestimentos, recorrendo a técnicas, como de soldagem. Entre os materiais de revestimento disponíveis para se melhorar o desempenho ao desgaste, encontram-se as ligas à base de Ni (níquel). Entre elas destaca-se a Colmonoy 6, conhecida comercialmente por Deloro 60, que pode ser encontrada, dentre outros, em discos, válvulas, assento de válvula, sede de válvula, pistões, êmbolos, eixos de bombas, transportador de rosca, parafuso sem fim, roda dentada, cossinetes, braço de balancim, articulação de rótula, mancais. (TECNICAL DATA SHEET,1990).

Essa superliga é uma alternativa na substituição de superligas à base de cobalto, devido a seu excelente desempenho ao desgaste, sob condições severas de operação. Na indústria nuclear, esta liga de Ni é utilizada para substituir a liga à base de cobalto que induz à atividade radioativa emitindo Co-60. (SUDHA, 2008).

Objetivos

- Avaliar o desempenho ao desgaste por deslizamento abrasivo, de revestimentos de uma superliga à base de Ni, Colmonoy 6, processado por Plasma a Arco Transferido (PTA).
- Avaliar o efeito dos parâmetros de processamento e da composição química do substrato na microestrutura desenvolvida e suas características.
- Estudar a relação entre a perda de massa no deslizamento abrasivo e as condições de processamento.

2 REVISÃO DA LITERATURA

O Plasma é considerado o quarto estado da matéria. Certos gases, ao receberem maior nível de energia, mudam suas propriedades, características elétricas e a temperatura. A ionização do gás, devido à criação de íons e elétrons livres dá características de condutor ao gás, que, nesse caso, denomina-se “plasma”. Por possuir elétrons livres e íons, é eletricamente condutor e difere das propriedades apresentadas pelos gases de modo geral. (BRACARENSE, 2000; WAINER, 1992; INFOSOLDA, 2007).

A expressão arco plasma descreve uma família de processos que utiliza um arco elétrico constricto devido ao bocal de constrição.

Processos a arco plasma são utilizados para corte, soldagem de superfície e ou união. Os materiais utilizados podem ser: pós atomizados metálicos ou cerâmicos e arame. A utilização de materiais particulados aumenta em muito a versatilidade do processo. O eletrodo de tungstênio utilizado em uma tocha plasma é não consumível, recolhido em um bocal através do qual o gás plasma flui. (BRACARENSE, 2000).

2.1 Princípios de operação

O gás sofre ionização ao atravessar o arco elétrico, formando o gás plasma. Aquecido dentro do bocal, o plasma sofre uma grande expansão e adquire altas velocidades, em torno de 6 km/s, por ter que passar por um pequeno orifício, acentuando o fenômeno de dissociação. (INFOSOLDA, 2007).

No processo por PTA (Plasma a Arco Transferido) utilizam-se gás de plasma, de transporte e de proteção. Se o material de adição é alimentado na forma de varetas ou arames, o processo é conhecido como PAW – *Plasma Arc Welding* e difere do processo PTA, basicamente, pela inexistência do sistema de gás de transporte.

No processo por PTA, antes da abertura do arco principal, é utilizado um arco piloto, que é iniciado através de um gerador de alta frequência, com corrente

limitada através de um resistor, que estabelece ligação entre o eletrodo de tungstênio (cátodo) e o bocal de cobre (ânodo), fechando o circuito (Figura 2.1). Quando a fonte de potência é acionada, o arco principal é estabelecido e o arco piloto é extinto, retornando quando o arco principal for extinto.

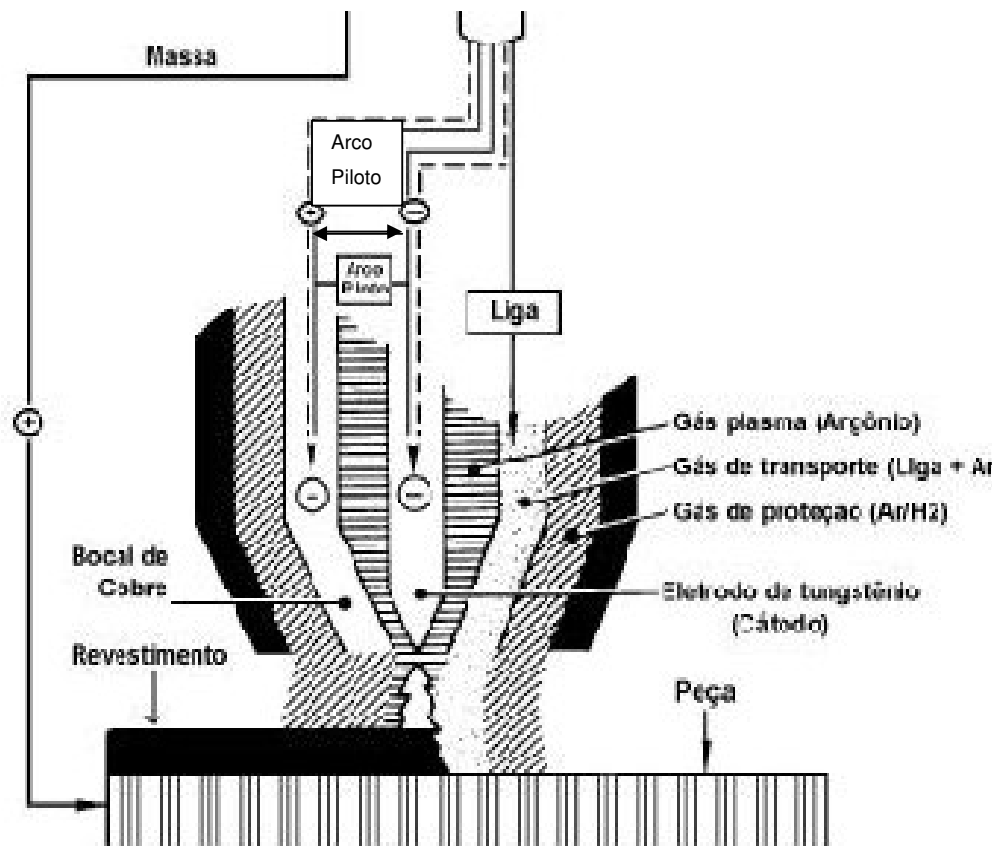


Figura 2.1- Representação esquemática do processo por Plasma a Arco Transferido, apresentando o arco piloto com ligação entre o eletrodo de tungstênio e o bocal de cobre

2.1.1 Comparação entre TIG e PTA (efeitos da constrição do arco)

Como o processo de soldagem por PTA evolui do processo TIG (tungstênio Inerte Gás), é interessante mostrar os dois processos e compará-los. Na Figura 2.2 está apresentada uma representação esquemática da tocha, nesses dois processos.

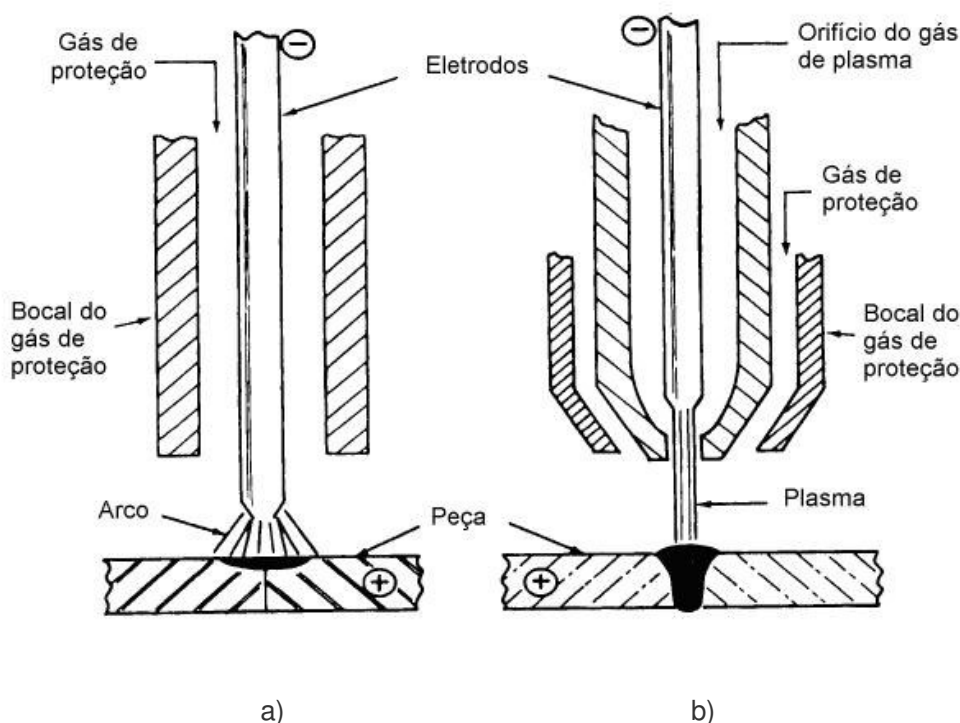


Figura 2.2 – Representação esquemática dos processos : a) TIG e b) PTA (BRACARENSE, 2000).

O processo TIG não tem o bocal constritor, ao contrário do que acontece no PTA. A constrição do arco possibilita altas densidades de energia, portanto, grande concentração de energia e, em consequência, altas temperaturas no arco. O bocal constritor aumenta consideravelmente a velocidade do gás, mas, principalmente, promove a estabilidade direcional e focal do arco e melhor controle sobre a energia do arco. (BRACARENSE, 2000; WAINER, 1992).

No processo TIG o arco é aberto, fazendo com que pequenas variações da distância tocha peça produzam alterações relativamente grandes das taxas de transferência de calor, enquanto no PTA o arco é colimado e se projeta em uma área pequena sobre a peça a ser soldada. Assim, pequenas variações da distância tocha peça não influenciam na área de incidência do arco. No PTA, a zona termicamente afetada é menor, devido à estabilidade direcional focal do arco, o que favorece a soldagem, pois quanto maior a área afetada no substrato maiores as modificações que pode sofrer, como coalescimento da estrutura por exemplo (WAINER, 1992).

No PTA, o eletrodo está dentro do bocal, não existindo possibilidade de contato com a peça o que diminui a possibilidade de contaminação do tungstênio no depósito e dá maior sobrevida ao eletrodo.

O gás que é alimentado pela coluna central da tocha é conhecido como gás de plasma ou gás central (geralmente argônio). São as moléculas do gás central que no arco serão decompostas em átomos e, após perder elétrons, tornar-se-ão íons. O gás ionizado, eletricamente condutor, forma um feixe de elevada energia que é transferido para a peça (feixe de plasma). A tocha é utilizada para se transferir, de forma focalizada, o feixe de plasma para a superfície da peça. O gás central também é responsável pela proteção do eletrodo de tungstênio. (BRACARENSE, 2000; WAINER, 1992).

O gás mais externo, conhecido como gás de proteção é empregado para proteger a poça fundida da atmosfera, evitando contaminação e oxidação. Para essa aplicação, o gás mais utilizado é o argônio ou a mistura de argônio e hidrogênio.

O terceiro sistema de gás é conhecido como gás de transporte e é utilizado para alimentar o material na forma de pó, no feixe de plasma, que irá formar o revestimento. (OLIVEIRA, 2001).

A Figura 2.3 apresenta os formatos dos arcos nas tochas de soldagem dos processos TIG (Tungstênio Inerte Gás) e do PAW (Soldagem a Arco Plasma). No processo TIG, o arco se aproxima de um cone, formando uma região grande, aquecida pelo arco, enquanto que o processo plasma mostra um arco bem direcionado e estável, com grande concentração de energia. (BRACARENSE, 2000; WAINER, 1992).



Figura 2.3 – Formato dos arcos nos processos de soldagem TIG (Tungstênio Inerte gás) e Soldagem a Arco Plasma. (BRACARENSE, 2000)

2.1.2 Tipos de arco

Utilizam-se duas variações do processo a plasma: Plasma a Arco Transferido e plasma a arco não transferido, conforme apresentado na Figura 2.4. No arco transferido, a peça fecha o circuito junto com o eletrodo, enquanto, no arco não transferido, o bocal constritor fecha com eletrodo. Em ambos, o eletrodo de tungstênio é o catodo, já o anodo no PTA é a peça a ser soldada. Na soldagem em peças condutoras, utiliza-se geralmente o Plasma a Arco Transferido, devido a sua melhor eficiência para esse tipo de material. (SUCHENTRUNK, 1997; INFOSOLDA, 2007).

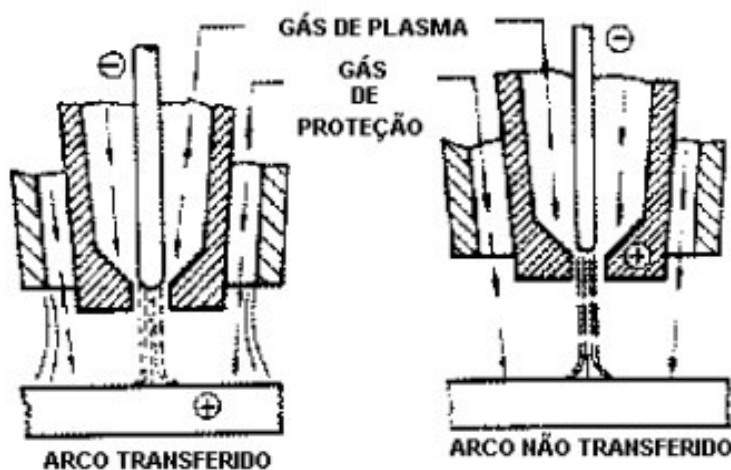


Figura 2.4 – Tipos de arco existentes no processo por PTA (INFOSOLDA, 2007)

2.1.3 Vantagens do processo PTA

- A mais importante é a estabilidade direcional focal do arco. Dentro de certos limites, para pequenas variações de distância da tocha, não ocorrem mudanças de suas características;
- Maior estabilidade do arco em baixos níveis de corrente, permitindo a soldagem de finas espessuras, a partir de 0,05 mm. (INFOSOLDA, 2007);

- Menor probabilidade de contaminação do cordão por inclusões de tungstênio e de contaminação do eletrodo pelo material de adição, uma vez que o mesmo encontra-se dentro do bocal constritor. (WAINER, 1992; INFOSOLDA, 2007);
- Por sua maior eficiência, o processo exige um menor número de passes de soldagem e de material a ser depositado em relação ao processo TIG;
- Grande flexibilidade na escolha da composição química do revestimento, pelo fato de se utilizar metal de adição em forma de pó (SUCHENTRUNK, 1997);

2.1.4 Desvantagens do processo PTA

- Devem existir cuidados na escolha e seleção da vazão dos diversos sistemas de gás, como o diâmetro do bocal constritor, entre outros;
- Maior custo do equipamento e de sua manutenção;
- Maior qualificação do operador.

2.1.5 Técnicas de soldagem

Na soldagem por PTA, existem duas técnicas que podem ser empregadas: a convencional, semelhante ao TIG, e o buraco de fechadura ou “furo controlado” (*keyhole*). No primeiro método de soldagem, o metal de base é fundido pelo arco com relativa pequena penetração, podendo-se utilizar ou não metal de adição, com pequenas correntes e vazão de gás de plasma. Na técnica *keyhole*, a poça de fusão é relativamente pequena, com um furo que atravessa o substrato, chamado furo passante. Para isso, se faz uma combinação especial da corrente do arco, com a velocidade de avanço, o fluxo do gás de plasma e o gás de proteção. Nessa técnica o deslocamento do metal fundido e a penetração total da espessura permite que impurezas sigam para a superfície e, antes da solidificação, sejam expelidos os

gases. A vazão do gás plasma nesse método é crítica e a velocidade do mesmo deve ser suficientemente baixa para que apenas a tensão superficial da poça de fusão fixe o metal fundido na junta. Ocorre ainda que a elevada corrente utilizada nesse modo leva a soldagem a ficar próxima de cortar a peça, tanto que, quando se utiliza o gás de plasma para o corte, seu fluxo é apenas ligeiramente superior ao utilizado na técnica *keyhole*. (MACHADO, 1996 ; WAINER, 1992). No presente trabalho a técnica utilizada é a convencional.

2.1.6 Aporte térmico

O aporte térmico é também conhecido como energia de soldagem ou aporte de calor.

O aporte térmico depende do processo, que pode ser de baixa e alta energia. Processos muito intensos, onde é pequena a área de aquecimento são de baixa energia como o Plasma. Muitas vezes se confunde energia de soldagem com intensidade de fonte e se diz que a soldagem a Plasma é de elevada energia quando se deseja dizer que é de alta intensidade ou alta densidade de energia. (INFOSOLDA, 2008).

Pode-se aumentar o aporte térmico, através do incremento da intensidade de corrente ou pela redução da velocidade de avanço. Quanto maior a quantidade de energia transferida ao material, maior será, portanto, a poça de fusão e a zona aquecida, levando a um menor gradiente térmico entre o revestimento e o substrato.

Para se calcular o aporte térmico dispendido num processo de soldagem a arco elétrico, utiliza-se a equação 2.1. (MACHADO, 1996).

$$E = \frac{UI}{V} \quad \text{Eq. 2.1}$$

Onde:

E – Energia de soldagem (J/mm ou J/cm)

U – Tensão (V)

I – Corrente (A)

V – Velocidade de avanço (mm/s ou cm/min)

Para um único processo, pode-se considerar, como fixo, o valor r (rendimento térmico ou eficiência da transmissão). Acrescentando-se r na Eq. 2.1 tem-se:

$$E = \frac{rUI}{V} \quad \text{Eq. 2.2}$$

Se um mesmo processo de soldagem for utilizado, para o cálculo do aporte de calor, a eficiência de transmissão pode ser considerada constante. (ZEEMANN, 2001) e, para efeitos de cálculos, pode ser retirada da Eq. 2.2 e, assim, pode ser calculada pela Eq. 2.1.

2.2 Ni e superligas à base de Ni

O elemento níquel possui símbolo químico Ni, número atômico 28, densidade de 8,9 g/cm³, na temperatura de 20°C, ponto de fusão de 1453°C e estrutura cristalina FCC.

O termo superliga é a designação para ligas à base de Ni, ferro Ni e cobalto, sendo muito utilizadas principalmente em altas temperaturas. As superligas de Ni encontram uma numerosa quantidade de aplicações em turbinas de jatos, veículos

espaciais, foguetes, submarinos, reatores nucleares, plantas termoelétricas e petroquímicas. (SIMS, 1972 ; BROOKS, 1982).

A principal razão para a existência de uma grande variedade de superligas é a sua resistência mecânica, em diversas temperaturas. A sua matriz permite grande solubilidade de diversos elementos na matriz austenítica, tais como: Cr, Fe, Si, W, Mo, V, Co e Ti, além de endurecimento por boretos, carbeto e intermetálicos. Assim, essas superligas apresentam elevada capacidade de manter a resistência à tração, à ruptura, elevado módulo de elasticidade, ductilidade e, por isso, boa resistência à fadiga em diversos ciclos, ao impacto e à fadiga térmica. (SIMS, 1972). O efeito desses elementos é o reforço da matriz com o objetivo de conter o movimento das discordâncias que geram distorções nos reticulados cristalinos, com conseqüente aumento da energia livre. O soluto tem a finalidade de decrescer essa energia se colocado, de modo a diminuir a distorção. Assim, para se ativar o movimento das discordâncias precisa-se fornecer maior quantidade de energia ao sistema, por ter o soluto diminuído a distorção da rede cristalina e, portanto, a energia dessa.

Influência de alguns elementos de liga para melhorar a resistência mecânica, a resistência à corrosão e à oxidação :

Cr (cromo) – Confere propriedades às superligas de Ni em elevadas temperaturas (resistência mecânica e resistência à corrosão). O cromo forma uma camada passivante de óxido a Cr_2O_3 , muito fina, aderente e estável. Serve como barreira, impedindo o avanço da corrosão. (BROOKS, 1982). O cromo melhora ainda a resistência à oxidação em vapores sulfurosos a elevadas temperaturas, em meios com ácido crômico (H_2CrO_4) e com ácido nítrico (HNO_3). A película passivante devido ao Cr é de espessura menor do que dois centésimos de microns e é indispensável para conferir resistência à corrosão. A concentração de cromo na película é maior do que em outras partes do metal. À medida que aumenta o teor de cromo, diminui a tendência à oxidação em baixas e altas temperaturas, para formar película protetora. Sua concentração tem de ser superior a 10%. (BROOKS, 1982). O cromo forma solução sólida com o Ni e seu limite de solubilidade no Ni varia de 35 a 40% em peso.

B (Boro) - O boro é um semimetal e pode estar presente em teores de 50 a 500 ppm nas superligas de Ni, sendo essencial na fabricação dessas pela formação de boretos. Geralmente o boro se precipita nos contornos de grãos, onde reduz a tendência de rasgamento desses, durante a aplicação da carga que leva à ruptura. (SIMS, 1972). Na liga, Colmonoy 6, se combina com Ni e principalmente com o Cr.

C (Carbono) – O carbono tem como principal finalidade a formação de carbetos nas superligas de Ni, contribuindo, assim, para o seu endurecimento. O carbono tem elevada afinidade com alguns elementos, tais como: cromo, titânio, tungstênio, molibdênio, nióbio, tântalo, entre outros, e, portanto, é atraído por eles, formando os carbetos. Entretanto, eles podem, em alguns casos, não ser benéficos de acordo com sua morfologia. (MANKINS, 1993 ; SVOBODA, 1993).

Si (Silício) – Melhora a resistência à oxidação em altas temperaturas. Na liga Colmonoy 6, o principal objetivo do silício no material é fornecer características de fluidez. Também é um importante elemento endurecedor por solução sólida e possui um potencial promotor de precipitados de intermetálicos, que também têm uma forte influência sobre propriedades de desgaste da liga. O siliceto formado nessa liga é o (Ni_3Si), que também sofre influência do boro, pois, quanto maior o conteúdo do boro na mesma, menor quantidade de silício requerida para formar o citado siliceto. (CROOK, 1992).

Fe (Ferro) – Reduz custos nas ligas de Ni (SVOBODA, 1993), melhora a solubilidade do carbono no Ni, com aumento da resistência em elevadas temperaturas. (ASPHAHANI, 1993).

Molibdênio - Eleva a resistência à corrosão em meios redutores; aumenta a resistência mecânica em altas temperaturas. (SVOBODA, 1993).

Algumas fases importantes nas superligas de Ni:

γ' (gama linha) - Mecanismo importante na elevação da resistência mecânica nas superligas de Ni é a precipitação de um composto intermetálico nas estruturas CFC. O titânio e o alumínio nas ligas de Ni se combinam e forma a fase gama linha ($\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$). Essa fase se precipita coerentemente com a matriz, devido à semelhança da estrutura, ambas CFC. Isso leva a uma grande estabilidade, dificultando o movimento das discordâncias em altas temperaturas e melhorando a

fluência. As quantidades de alumínio e titânio situam-se entre 1% a 5% de cada um dos elementos. (STOLOFF, 1993). A fase γ' , diferentemente da matriz γ , não amolece de modo significativo com a elevação da temperatura, razão pela qual há elevada resistência das superligas de Ni nessa fase. Todavia, a ductilidade da fase γ é muito maior do que a da fase γ' , não sendo possível a presença em excesso dessa última. O efeito de endurecimento depende da morfologia e de como os precipitados γ' estão dispersos. (BROOKS, 1982). Em relação à composição química da γ' , pode haver variação, com substituição de parte dos átomos de Ni por Co, de Al por Ti (na proporção até de 50%) ou em menores proporções, por átomos de vanádio, tântalo e nióbio. O cromo, o ferro e o molibdênio podem substituir, de forma parcial, Al ou Ni. (SIMS, 1972).

γ'' (gama duas linhas)-Essa fase possui estrutura tetragonal de corpo centrado e sua composição corresponde a um intermetálico, o Ni_3Nb . Seu efeito endurecedor supera a fase γ' . Apresenta ainda instabilidade a temperaturas acima de 650 °C e alta resistência à baixa e média temperatura. (STOLOFF, 1993 ; SLAMA, 2000).

Formação de Carbetos – A sua função básica é contribuir para o endurecimento das superligas de Ni. Os carbetos mais frequentemente utilizados nas liga de Ni são: MC, M_6C , M_7C_3 , $M_{23}C_6$. (essas são fases onde a estequiometria apresenta diferentes proporções de um metal M e átomos de carbono). Essas fases, dificultam o movimento dos contornos de grãos, em elevadas temperaturas, diminuindo o amolecimento devido ao aumento do tamanho de grão, melhorando a resistência à fluência. A estabilidade da temperatura é função do tipo de carbeto. Por exemplo, o MC tem sua formação durante a solidificação e é instável em baixas temperaturas, porém é estável em altas temperaturas. Assim, determinados tipos de carbetos podem se precipitar, de acordo com a faixa de temperaturas nas quais a liga é utilizada. (SIMS, 1972).

Boretos – Eles são normalmente encontrados nas superligas na forma M_3B_2 , com unidade celular tetragonal e melhoram a resistência à fluência. São partículas duras, com morfologia que varia de blocos para meia lua e aparecem nos contornos de grãos. (DONACHIE, 2002). A superliga de Ni Colmonoy 6 contém boretos de cromo, que possuem elevada dureza. (TECHINICAL DATA SHEET, 1990).

Vários sistemas baseados em ligas de Ni ou que contenham alto teor de Ni são usados em instrumentos e controle de equipamentos para medir e regular características elétricas ou são usadas em fornos e equipamentos para gerar calor.

2.2.1 Liga de Ni, Colmonoy 6

A Colmonoy 6 é uma liga à base de Ni, reconhecida por sua excelente resistência ao desgaste. (CROOK, 1992; DAS, 2003; PAUL, 2006; TECHNICAL DATA SHEET, 1990).

Essa superliga de Ni não possui os elementos formadores das fases gama linha e gama duas linhas e seu endurecimento ocorre por causa dos boretos e carbeto uniformemente dispersos na matriz de Ni e, por isso, apresenta excelente resistência à abrasão (CROOK, 1992; DAS, 2003).

DAS (2003), estudando a liga Colmonoy 6 depositada através do processo TIG, mostra que a alta dureza dos depósitos da Colmonoy 6 é devido à formação de boretos de cromo e carbeto de cromo.

Segundo Conde (2002), os precipitados uniformemente distribuídos na matriz de Ni, são basicamente compostos de Cr, e maior percentagem de Cr para precipitados de cor negra e menor percentagem desse elemento, para precipitados de cor cinza. Há também a presença de Ni e Fe nesses precipitados, enquanto a matriz em que essas fases estão distribuídas é composta principalmente de Ni, que também contém Fe, Cr e Si.

De acordo com Sudha (2008), a microestrutura da Colmonoy 6 é rica em solução sólida de Ni e contém, dentre outras as fases: Cr_2B , Cr_3C_2 e Cr_7C_3 . Esse autor encontrou, uniformemente distribuídos na matriz de Ni, precipitados de diversas morfologias: aciculares, cuboidal, lamelares.

2.3 Desgaste abrasivo

Para ocorrer desgaste abrasivo é necessário que haja movimento relativo entre os dois corpos. Um corpo pode estar fixo e o outro em movimento, ou os dois se movimentarem ao mesmo tempo, possuindo algum contato. (ZUM GAHR, 1987).

De acordo com Archard tem-se a Eq.2.3 que fornece a relação entre taxa de desgaste por distância deslizada e a dureza. (KALISH , 1987).

$$Q = \frac{KW}{H} \quad \text{Eq. 2.3}$$

Onde:

Q - Taxa de desgaste por distância deslizada

K - Coeficiente de desgaste que é adimensional

W - Carga transversal ou normal (kgf)

H - Dureza (kgf/mm²)

Quanto maior for a perda de massa ou de volume do material, maior será a taxa de desgaste Q e, inversamente, quanto maior for a resistência ao desgaste por deslizamento abrasivo da liga estudada, menor será a perda de massa ou de volume e em conseqüência, menor a taxa de desgaste Q . Neste trabalho foi utilizada a perda de massa e taxa de desgaste como indicadores de desgaste por deslizamento abrasivo.

Como mostra a eq. 2.3, a taxa de desgaste por distância deslizada Q é diretamente proporcional à carga normal e inversamente proporcional à dureza. Segundo Rabinowicz(1995), o volume de material retirado cai com o aumento da dureza ou a resistência ao desgaste aumenta com a dureza. Na prática, observa-se, em diversos tribosistemas abrasivos, que a dureza não é o fator mais determinante e

que se encontram, corpos com durezas muito elevadas, porém com baixa tenacidade (resistência à propagação de trincas), que são facilmente danificados por microtrincamento, diminuindo, consideravelmente, o seu desempenho ao desgaste. (HUTCHINGS, 1992; ZUM GAHR, 1987). Para haver desgaste abrasivo, é preciso haver rugosidade entre os corpos em movimento. A dureza dos materiais em contato pode influenciar positivamente ou negativamente em relação ao desgaste. Segundo Zum Gahr (1987), a teoria de desgaste abrasivo está centrada no conceito de um único riscamento. A razão entre o volume de material removido em relação ao sulco do desgaste pode ser descrita pela fração f_{ab} definida na Figura 2.5.

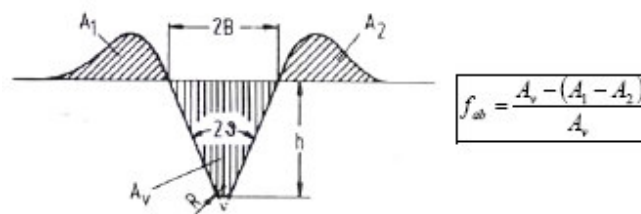


Figura 2.5 – Definição da fração (ZUM GAHR, 1987)

Na Figura 2.5, A_v é a área do sulco medida numa seção transversal na direção do riscamento, $(A_1 + A_2)$ são as áreas de material deslocado por deformação plástica para as bordas do risco. Assim, pode-se definir: Microsulcamento ideal, quando $f_{ab} = 0$, não havendo remoção de material, apenas deformação plástica; Microcorte: $f_{ab} = 1$, onde o material removido é igual ao volume do sulco; no Microtrincamento: $f_{ab} > 1$, o material vizinho ao risco sofre microtrincamento, o que torna o volume retirado superior ao do sulco.

Quando aumenta o f_{ab} , aumenta também o desgaste abrasivo até que para $f_{ab} = 1$, o sulco gerado seja igual ao material removido, tendo-se assim, o microcorte. Quando o mesmo crescer tanto que o material for maior que o sulco gerado, tem-se então o microtrincamento.

De acordo com Zum Gahr (1987), para haver desgaste abrasivo, é preciso haver movimentos relativos entre duas superfícies e o desgaste abrasivo é o deslocamento ou a retirada de material devido a partículas duras presentes entre os corpos. Segundo Hutchings(1992), o desgaste abrasivo ocorre quando partículas

duras ou saliências do contra-corpo deslocam ou removem material do corpo. No presente estudo, o desgaste por deslizamento abrasivo foi quantificado e avaliado através da perda de massa e taxa de desgaste.

Tem sido mostrado que o desgaste abrasivo deve ocorrer por mecanismos dominados por deformação plástica e ou por fratura frágil. No primeiro caso, a dureza do corpo é um importante fator determinante para a resistência ao desgaste, enquanto que, no segundo caso, a tenacidade à fratura é mais importante, todavia a dureza é ainda um fator importante. Até em materiais com baixa tenacidade, a fratura não ocorrerá necessariamente. Ela é favorecida por condições severas de contato. (HUTCHINGS,1992).

Quando se fala em desgaste, geralmente refere-se ao desgaste abrasivo, que ocorre pela ação de partículas duras pressionadas, deslizando umas sobre as outras ou sobre as superfícies. O desgaste abrasivo pode ser denominado de dois corpos e de três corpos. Chama-se de *2 corpos*, quando uma superfície rugosa e dura, ou uma superfície contendo fases duras desliza sobre uma superfície de dureza menor, produzindo-lhes ranhuras, e, de *3 corpos*, quando as partículas duras são livres para rolar e deslizar entre as 2 superfícies. Em geral, a abrasão começa em dois corpos e, depois, com o desprendimento das partículas, devido ao desgaste do corpo ou contra-corpo ou de ambos, evolui para desgaste a três corpos.(HUTCHINGS, 1992; ZUM GAHR,1987).

O material das ranhuras é deslocado na forma de partículas de desgaste geralmente soltas (RABINOWICZ,1995). Essas partículas são tipicamente pequenas, duras e possuem extremidades afiadas – tal como de grãos de areia, partículas de metal ou óxido, que friccionam uma superfície de metal.

O desgaste produzido por uma partícula abrasiva pode ser provocado por um processo de microcorte, por um processo de fadiga causada pelo microsulcamento, microfadiga, ou por microlascamentos, se a superfície for frágil.

O desgaste abrasivo pode ser reduzido com a adição de partículas duras na matriz, de modo a interromper os riscos (microcorte, microsulcamento), dependendo da distribuição e do tamanho relativos dessas em relação ao abrasivo. Às vezes, visando à redução dos gastos com manutenção, um dos componentes do par de atrito é feito relativamente com menor dureza e é projetado para ser facilmente e

economicamente substituído. Isso acontece, por exemplo, com superfícies duras de hastes giratórias que são protegidas pelo uso de partes mais maleáveis, mancais facilmente substituíveis e buchas. Às vezes é desejável que o mancal seja suficientemente mole, para permitir que as partículas abrasivas duras fiquem completamente engastadas, de forma que elas não formem saliência sobre a superfície, atuando como partículas abrasivas. (ZUM GAHR, 1987)

A resistência ao desgaste abrasivo não é apenas função da dureza do material que está submetido à ação do contra-corpo, pois um material muito duro pode ter seu desgaste muito aumentado pelo microtrincamento, o que pode acontecer, dentre outros, com materiais cerâmicos, por exemplo. Portanto, a dureza de um material deve ser acompanhada também da tenacidade (resistência à propagação de trincas). Existe um ponto ótimo na qual uma carga crítica, aliada a certa tenacidade resulta em um ponto de mínimo desgaste. Para cargas maiores e uma mesma tenacidade, o desgaste cresce (ZUM GAHR, 1987). Também ocorre um ponto de pico máximo de desgaste, que é para materiais muito duros e para a carga mais elevada, em função do microtrincamento. Isso é interessante para resistir ao desgaste um tribosistema com uma matriz tenaz e com fases duras distribuídas na mesma. Também contribuem para o aumento ou não da resistência ao desgaste a uniformidade da distribuição dos precipitados, o seu tamanho e sua afinidade com a matriz e dureza. (ZUM GAHR, 1987). Também ocorre um ponto de pico máximo de desgaste, para materiais muito duros e para a carga mais elevada, em função do microtrincamento.

3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

3.1 Introdução

Os depósitos utilizados no presente trabalho são de uma superliga à base de Ni, Colmonoy 6, depositada através do processo PTA (Plasma a Arco Transferido). Esse equipamento está instalado no Laboratório de Engenharia de Superfícies do departamento de Engenharia Mecânica, (DEMEC) da Universidade Federal do Paraná. Os revestimentos foram depositados, variando-se os parâmetros de velocidade e intensidade de corrente, sobre dois substratos: o aço AISI 1020 e o aço AISI 304. Mantiveram-se constantes todos os outros fatores de processamento, tais como :vazão do gás de plasma, de proteção e de transporte; taxa de alimentação do pó e distância tocha-peça. Após a deposição, retiraram-se amostras dos cordões para caracterização, através de:inspeção visual, microdureza, diluição, microestrutura, ensaio de desgaste por deslizamento abrasivo e EDS. Com a finalidade de avaliar a influência dos parâmetros de processamento: intensidade de corrente e velocidade de avanço, e influência do substrato nas características dos depósitos e na perda de massa, como indicativo da resistência ao desgaste por deslizamento abrasivo.

3.2 Materiais

Depositou-se uma liga atomizada denominada Colmonoy 6, pelo processo PTA (Plasma a Arco Transferido), sobre placas de aço carbono comum AISI 1020 e outra de aço inoxidável AISI 304, com dimensões: 100x100x 12mm. A composição química dos materiais utilizados está apresentada na Tabela 3.1 .

Tabela 3.1 – Composição química da superliga à base de Ni e dos substratos (% em peso)

Material	C	Si	Mn	P	S	Cr	B	Ni	Fe
Colmonoy 6	0,7	2-4,5	-	-	-	14-15	3,1-3,5	bal	4,0
AISI 1020	0,23	-	0,3-0,7	0,4	0,05	-	-	-	bal
AISI 304	0,08	1,0	2,0	0,04	0,03	18-20	-	8-10,5	bal

3.3 Processamento

A deposição da liga seguiu os parâmetros de processamento da Tabela 3.2, com correntes e velocidade de avanço da tocha ou velocidade de deslocamento da tocha (em cm/min). Foram analisadas amostras de 12 cordões, seis revestimentos sobre o AISI 1020 e seis sobre o AISI 304.

Tabela 3. 2 – Parâmetros de processamento e dados utilizados na verificação do cálculo da média da diluição dos revestimentos, tendo como substratos os aços AISI 1020 e AISI 304.

I(A)	V (cm/min)
130	5
	15
	20
170	5
	15
	20

O equipamento Plasma a Arco Transferido (PTA) utilizado é do modelo Starweld 300M Welding System da Delloro Stellite, com alimentação em forma de pó. As outras variáveis: vazão do gás de plasma, vazão do gás de proteção, vazão do gás de alimentação do pó, distância tocha/substrato e taxa de deposição foram mantidas constantes. Seus dados estão na tabela 3.3

Tabela 3.3 – Parâmetros de processamento por PTA

Descrição	Valores
Eletrodo	3/16 com respectivo bocal
Velocidade de deposição	100 mm/min
Vazão do gás de plasma	Ar 2,0 l/min;
Vazão do gás de proteção:	Ar 15 l/min;
Vazão do gás de alimentação do pó:	Ar 2,0 l/min;
Distância tocha/substrato	10 mm;

3.4 Caracterização dos revestimentos

3.4.1 Aspectos gerais

A análise dos aspectos gerais dos cordões de solda, foi feita logo após a deposição, através de inspeção visual. Procedeu-se a verificação do acabamento superficial geral dos cordões quanto à presença de fissuras, trincas e poros.

3.4.2 Diluição

A diluição é definida como sendo a participação do material pertencente ao substrato na camada resultante do revestimento, conforme Figura 3.4.

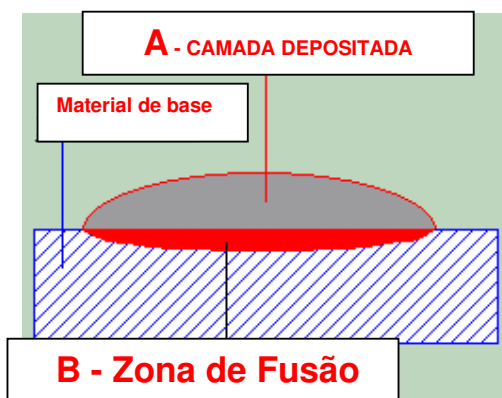


Figura 3.4 – Diluição por técnica de soldagem (MARCONI, 2002).

A medição da diluição foi efetuada através da análise de proporção das áreas, nas imagens das seções transversais dos cordões. Nesse caso, é feita a medição da área transversal do substrato fundido e encontrada a relação com a área transversal total de material solidificado (revestimento+substrato). As medidas das áreas foram realizadas utilizando um software de aquisição e análise de imagem.

Para a verificação da diluição, foram consideradas as três velocidades testadas: 5cm/min, 15cm/min e 20cm/min. Nessa etapa, foram analisados 12 cordões com três cortes transversais. Depois de embutidas a quente, lixadas, polidas e fotografadas, foi determinada a diluição de cada. Para se avaliar a reprodutibilidade, procedeu-se o cálculo para cada um dos 36 corpos de prova. (Tabela 3.2, p.32).

A Eq. 3.4 é utilizada para proceder ao cálculo da diluição de um revestimento obtido por soldagem. Considera-se A como camada do revestimento depositado e B com sendo a porção de substrato fundida.

$$D(\%) = \frac{B}{A + B} \cdot 100 \quad \text{Eq. 3.4}$$

3.4.3 Perfis de microdureza Vickers

Os perfis da Microdureza Vickers foram medidos nos cordões depositados nos dois substratos: o aço AISI 1020 e o aço AISI 304, utilizando-se a menor e a maior velocidade de deposição: 5cm/min e 20cm/min, para cada intensidade de corrente. Para se proceder a microdureza, cortaram-se os cordões no sentido transversal (Figura 3.5) e fez-se o embutimento a quente, em baquelite, e, em seguida, passaram por lixamento em lixas de carbeto de silício com granulação de 220, 320, 400, 600 e 1200, seguindo-se o polimento com alumina.

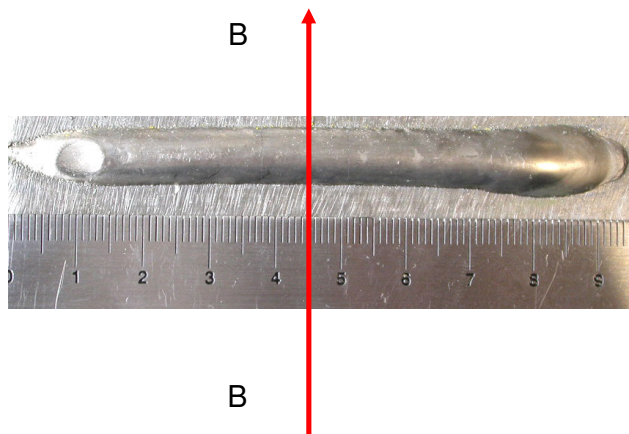


Figura 3.5 - Cordão de solda cortado transversalmente, através do plano BB.

O microdurômetro Vickers utilizado foi o da marca Tuckon, encontrado no LAMATS/DEMEC/UFPR. O perfil de microdureza foi realizado com um indentedor Vickers (pirâmide de diamante de 136°) e uma carga de 500g (HV 0,5). Nesse procedimento é feita, inicialmente, a focalização da interface revestimento/baquelite, pelo sistema óptico do microdurômetro e, em seguida, promovido um deslocamento de $125\mu\text{m}$ ($0,125\text{mm}$), no sentido do revestimento para o substrato (começando pelo topo do cordão). Nesse ponto, é feita a primeira indentação do grupo de indentações espaçadas de $250\mu\text{m}$ ($0,25\text{mm}$) cada, o que leva a um afastamento de, no mínimo, $2.5x$ a diagonal das mesmas (ABNT NBR 6672/81). Foram executadas três colunas de indentações, todas com o mesmo espaçamento, conforme Figura 3.6. A microdureza de cada posição do perfil foi considerada como a média das microdurezas obtidas na mesma linha horizontal. (ABNT NBR 6672/81).

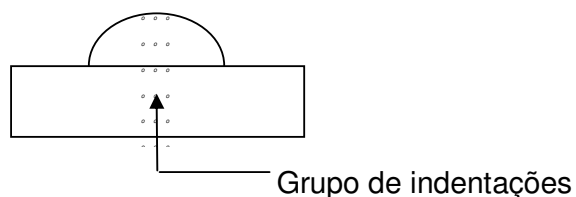


Figura 3.6 - Esquema da sequência de indentações para levantamento do perfil de microdureza dos revestimentos

Para se proceder à caracterização, os cordões foram medidos obtendo-se sua largura e altura do reforço e a penetração, conforme ilustrado na Figura 3.7.

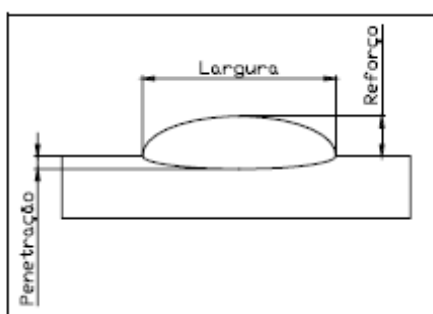


Figura 3.7 - Esquema mostrando as medidas da largura, reforço e penetração a do cordão de solda.

3.4.4 Análise da microestrutura

Após a medição da microdureza, as amostras sofreram ataque eletroquímico em solução de 15 ml de ácido clorídrico e 100 ml de etanol, utilizando-se uma tensão na fonte de 6 v, com duração de até 90s. O mesmo procedimento foi realizado para os cordões depositados sobre os dois substratos, todavia os tempos de duração do ataque, quando o metal de base foi o AISI 304, foram inferiores, até no máximo, a 15s.

Após o ataque químico, as amostras atacadas foram analisadas em microscópio ótico Olympus e no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) JEOL

modelo JSM 6360 LV, com baixo e alto vácuo. Novamente foram caracterizados revestimentos processados sobre os dois substratos, com a maior e a menor velocidade de deposição 20 e 5cm/min e duas intensidades de correntes.

3.4.5 Ensaio de desgaste por deslizamento

Os revestimentos da liga Colmonoy 6 foram submetidos ao ensaio de desgaste por deslizamento abrasivo, para análise qualitativa. Trata-se de um ensaio qualitativo. No equipamento onde se executa o ensaio, o corpo de prova é fixado no mandril e desliza perpendicularmente contra um disco (que contém uma lixa de carbeto de silício de granulação 220), que gira acoplado a um motor elétrico. Utilizou-se, como parâmetro para se avaliar a resistência ao desgaste, a medida da perda de massa ocorrida durante o ensaio. Pesou-se a massa de cada pino, antes do ensaio, numa balança de 0,1 mg de precisão, tendo-se o cuidado de limpar com álcool e de se secar a amostra antes de cada pesagem. Esse procedimento foi feito entre cada etapa de 500m, para serem retirados fragmentos do abrasivo (carbeto de silício) e cavacos do corpo de prova. Cada etapa teve um percurso parcial, no qual cada pino deslizou perpendicularmente contra o disco, de 500m até um total de 5000 m. A carga aplicada foi de 10N e a velocidade tangencial de 1,5m/s. A cada 500m, muda-se a posição do pino, para que deslize sobre nova pista e se pese a massa, para se ter o controle da perda de massa. O ensaio foi realizado em um equipamento desenvolvido no Laboratório de Engenharia de Superfícies do DEMEC/UFPR de acordo com a norma ASTM G99-95a, Figura 3.8. Ele permite o controle da velocidade tangencial dos pinos, através do controle da rotação do motor, na faixa de 30rpm a 1100 rpm, sendo esses valores determinados através de um inversor de frequência a ele acoplado.



Figura 3.8 - Equipamento utilizado no ensaio de desgaste por deslizamento abrasivo seguindo a norma ASTM G99-95a

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O efeito dos parâmetros de processamento sobre as características dos depósitos da liga Colmonoy 6 foi inicialmente avaliado nos cordões processados sobre o aço carbono AISI 1020. Na sequência, avaliou-se a influência da composição química do substrato sobre as características dos revestimentos processados com os parâmetros em estudo. Finalmente, o desempenho ao desgaste por deslizamento abrasivo foi caracterizado, utilizando-se a perda de massa e a taxa de desgaste como indicativo da resistência ao desgaste por deslizamento abrasivo.

Foram utilizados dois sistemas: revestimento/substrato, onde, no primeiro os revestimentos foram depositados sobre o substrato o AISI 1020 e, no segundo, sobre o AISI 304.

4.1 Efeito dos parâmetros de processamento

Após a deposição sobre o aço AISI 1020, os cordões de solda foram identificados e verificado seu aspecto geral. As figuras 4.1 e 4.2 mostram o aspecto geral dos cordões de solda para as intensidades de corrente de 130 e 170A e a velocidade de avanço de 20cm/min. A qualidade dos revestimentos ficou comprometida, como confirma a presença de trincas (a, nas Figuras 4.1 e 4.2), diversas descontinuidades (b, na Figura 4.1) e salpicos (c, nas Figuras 4.1 e 4.2). As trincas podem ser evitadas através de preaquecimento. As descontinuidades podem ser contornadas através do aumento do aporte térmico, como o incremento da corrente mantendo-se a velocidade fixa (como observado na Figura 4.2) ou pela diminuição da velocidade, mantendo-se constante o valor da corrente. Seccionando-se transversalmente não foi observado nenhum poro no revestimento em nenhum dos cordões para condições de processamento em estudo.

O aumento da intensidade de corrente resultou em cordões mais largos, para revestimentos soldados. (FISHER, 1986).

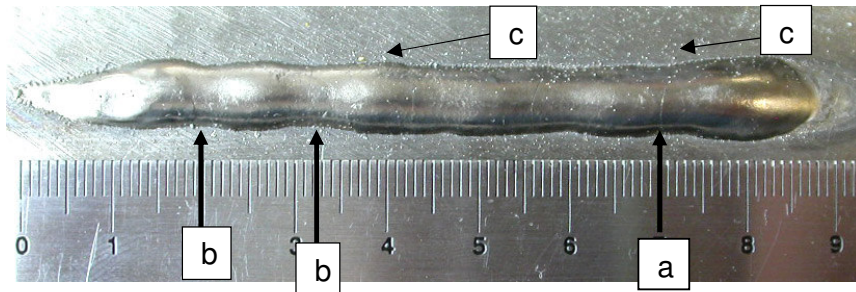


Figura 4.1 – Aspecto do cordão na soldagem por PTA, da liga Colmonoy 6. Com parâmetros de 130A e velocidade de avanço de 20cm/min. Como substrato o aço AISI 1020: a) trinca, b) descontinuidades, c) salpico.

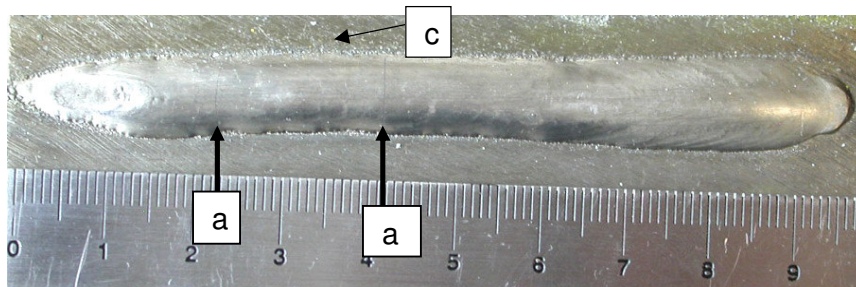
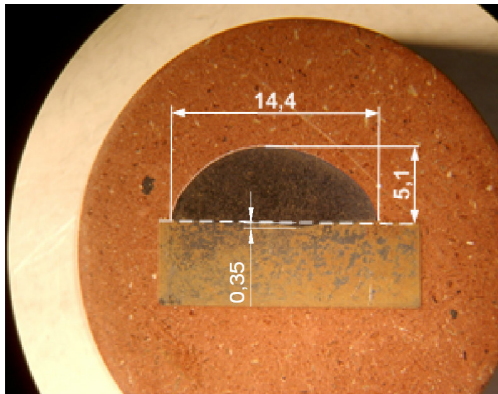


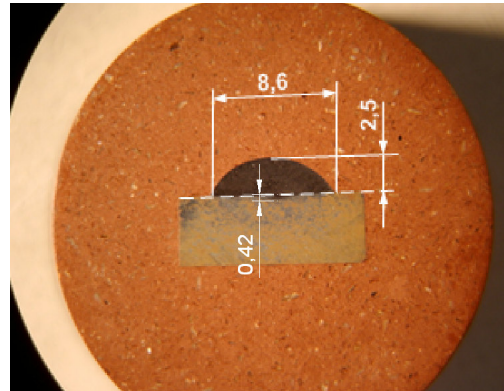
Figura 4.2 – Aspecto do cordão na soldagem por PTA, da liga Colmonoy 6. Com parâmetros de 170A e velocidade de avanço de 20cm/min. Como substrato o aço AISI 1020 : a) trinca, c) salpico.

As Figuras 4.3 e 4.4 apresentam a geometria da seção transversal dos revestimentos e as medidas em mm: da largura, altura do reforço e da penetração dos cordões dos depósitos da Colmonoy 6 que correspondem aos valores mostrados na Tabela 4.1.

Nas Figuras 4.4a e b, a camada depositada está indicada com a letra A e a zona de fusão com a letra B.

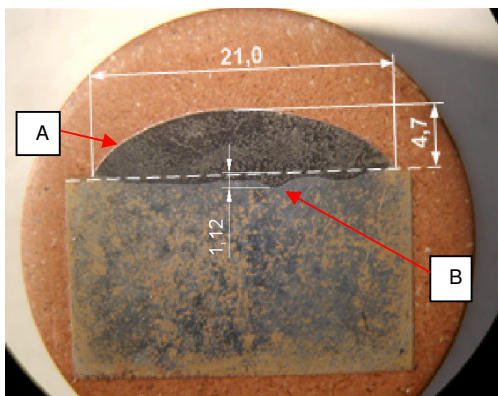


a

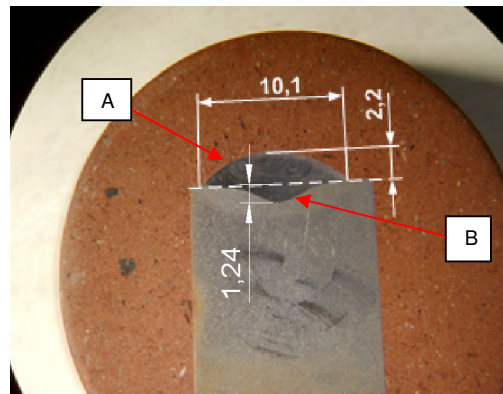


b

Figura 4.3 – Geometria da seção transversal dos revestimentos dos depósitos da Colmonoy 6 por PTA, com corrente fixa de 130 A. a) 5 cm/min, (b) 20 cm/min. Medidas em mm.



a



b

Figura 4.4 – Geometria da seção transversal dos revestimentos dos depósitos da Colmonoy 6 por PTA, com corrente fixa de 170A. a) 5 cm/min, (b) 20 cm/min. Medidas em mm.

Tabela 4.1 – Dimensões dos revestimentos obtidos com a mudança da intensidade de corrente e velocidade, substrato o AISI 1020.

Corrente (A)	Velocidade (cm/min)	Largura (mm)	Altura do reforço (mm)	Penetração (mm)
130	5	14,4	5,1	0,35
	20	8,6	2,5	0,42
170	5	21	4,7	1,12
	20	10,1	2,2	1,24

A utilização da intensidade de corrente de 130A minimiza a “interação” com o substrato de aço carbono AISI 1020, como se evidencia na Figura 4.3. Entretanto, com corrente de 170A, observam-se claramente as zonas de fusão e destaca-se a maior profundidade da mesma, que ocorre exatamente para o revestimento com maior velocidade correspondente à Figura 4.4b.

O aporte térmico ou energia de soldagem depende dos parâmetros de processamento selecionados e para as condições de estudo, está determinado a seguir. O aporte térmico para corrente fixa de 130A e velocidades de 5 e 20cm/min, de acordo com Machado (1996) , pode ser calculado através da equação 2.1.

$$E = \frac{U * I}{V} \quad (\text{eq. 2.1})$$

Onde:

E – Energia de soldagem (J/mm ou J/cm)

U – Tensão (V)

I – Corrente (A)

V – Velocidade de avanço (mm/s ou cm/min)

Cálculo do aporte térmico para as velocidades de 5cmmin e 20cm/min, utilizando-se a corrente em 130A.

$$E1 = \frac{U * 130}{20} \quad (\text{eq. 2.4})$$

$$E2 = \frac{U * 130}{5} \quad (\text{eq. 2.5})$$

Dividindo $\frac{E1}{E2}$, tem-se :

$$\frac{E1}{E2} = \frac{\frac{1}{20}}{\frac{1}{5}} = \frac{5}{20} \quad (\text{eq. 2.6})$$

$$\frac{E1}{E2} = \frac{1}{4} \quad (\text{eq. 2.7})$$

$$E2 = 4E1$$

Verifica-se que o valor do aporte térmico do cordão com velocidade 5cm/min para a corrente de 130A é quatro vezes superior ao valor do aporte térmico do cordão com velocidade de 20cm/min. A mesma relação pode ser obtida para corrente de 170A.

Cálculo do aporte térmico fixando-se a velocidade em 20cm/min, para as duas intensidades de corrente: 170A e 130A.

Da eq. 2.1 tem-se:

$$E3 = \frac{U * 170}{20} \quad (\text{eq. 2.8})$$

$$E4 = \frac{U * 130}{20} \quad (\text{eq. 2.9})$$

$$\frac{E3}{E4} = \frac{\frac{U * 170}{20}}{\frac{U * 130}{20}} = \frac{170}{130} \quad (\text{eq. 2.10})$$

$$\frac{E3}{E4} = \frac{170}{130} \quad (\text{eq. 2.11})$$

$$\frac{E3}{E4} = 1,3 \quad (\text{eq. 2.12})$$

$$E3 = 1,3E4$$

Verifica-se que o valor do aporte térmico dos revestimentos processados com velocidade fixa de 20cm/min e intensidade de correntes de 170A é 1,3 vezes superior ao valor do aporte térmico dos revestimentos processados com corrente de 130A e mesma velocidade. Relação igual pode ser obtida, fixando-se a velocidade em 5cm/min para as duas intensidades de corrente.

De acordo com teoria da soldagem é esperado que o aporte térmico tenha um impacto direto sobre as características dos cordões, como a diluição. Na Figura 4.5, apresentam-se os valores de diluição para as três velocidades de teste usadas e os dois níveis de intensidade de corrente.

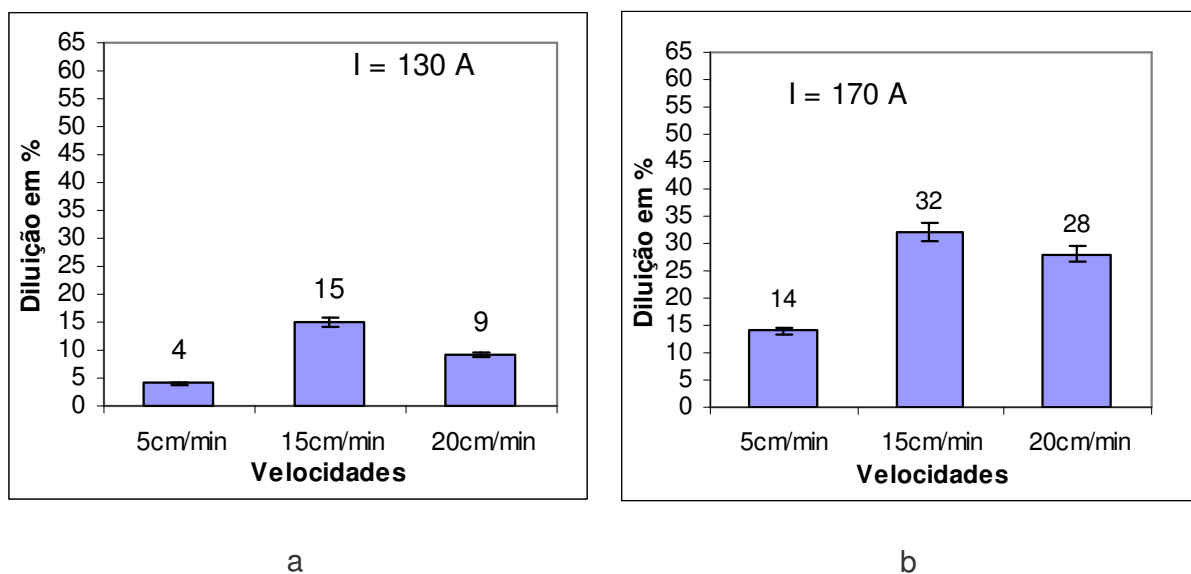


Figura 4.5 – Efeito da corrente nos valores da diluição dos revestimentos da Colmonoy 6 por PTA, sobre substrato de aço AISI 1020. a) $I=130\text{A}$. b) $I=170\text{A}$, em função da velocidade

O aumento da diluição em consequência do incremento na intensidade de corrente é evidenciado na Figura 4.5. Esse comportamento resulta do maior aporte térmico (mantendo-se os outros parâmetros constantes) que causa uma maior penetração no metal de base, e em consequência, uma maior diluição. (DAVIS, 2001; WU, 1996). Tendência similar é observada para a redução de velocidade de avanço de 20 para 15cm/min.

A redução da velocidade causa um aumento da quantidade de pó depositado por minuto. Para a velocidade variando de 20cm/min para 15cm/min, o aumento da quantidade de pó depositado não é significativo, porém, com mudança de 20 cm/min para 5cm/min, a quantidade de pó depositada por minuto é muito elevada. O reforço dos cordões processados com velocidade de 20cm/min e 5cm/min mostraram esse efeito, Tabela 4.1 (p.42). Velocidade de avanço de 20cm/min para 15cm/min causa um aumento na diluição associado ao maior aporte térmico. No entanto, a redução na velocidade de avanço mais significativa para 5cm/min inverte esse comportamento. Para as duas intensidades de correntes testadas, obteve-se o menor nível de diluição, ao contrário do que se pode prever de acordo com o aporte térmico.

Esse comportamento pode ser atribuído à condutividade térmica da liga de Ni depositada. A liga Colmonoy 6 possui baixa condutividade térmica, 104 BTU. (TECNICAL DATA SHEET, 1990; MATWEB, 2008; STELLITE, 2008), o que faz com que o revestimento absorva calor, (CARBÓ, 2001) absorvendo mais energia de arco. Quando a velocidade de avanço é muito baixa (5 cm/min), o aporte térmico aumenta quatro vezes em relação à velocidade de 20cm/min. No entanto, o volume de material depositado por unidade de comprimento aumenta a espessura do revestimento de forma significativa. (Todos os outros parâmetros são mantidos constantes). Prevalece à capacidade da liga de absorver calor, diminuindo a quantidade deste que chega ao metal de base, havendo um decréscimo no volume de substrato fundido e, portanto, da diluição. Observa-se que quanto maior a velocidade, menor o volume da liga depositada e, portanto, diminui a influência da condutividade térmica da liga sobre as características dos cordões. Além disso, de acordo com WU(1996), no processo por PTA, ocorre que a maior parte do calor é absorvida exatamente pelo material de aporte, em relação a outros processos, diminuindo o aporte de calor no substrato, em consequência, levando à menor diluição. Assim, a própria concepção do processo ajuda o efeito observado.

Para velocidades de avanço com valores próximos, como: 20cm/min e 15cm/min, o volume de material depositado por unidade de comprimento é similar e é esperado poder-se observar o efeito dos diferentes aportes térmicos, minimizando o efeito do volume de material depositado sobre a diluição.

4.1.1 Microdureza

A Figura 4.6, apresenta, para as velocidades de 5cm/min e 20cm/min, o perfil de microdureza em função da corrente. Verifica-se que quanto maior a intensidade de corrente elétrica, menor o valor da microdureza dos revestimentos.

Em revestimentos da Colmonoy 6, é esperado que um incremento na diluição cause um decréscimo na dureza do depósito (DAS, 2003). Isto acontece porque com o aumento da diluição mais material do metal de base é misturado ao revestimento, alterando as propriedades deste em relação ao especificado para o

material de aporte. Isto porque de modo geral a dureza do revestimento é superior ao do metal de base.

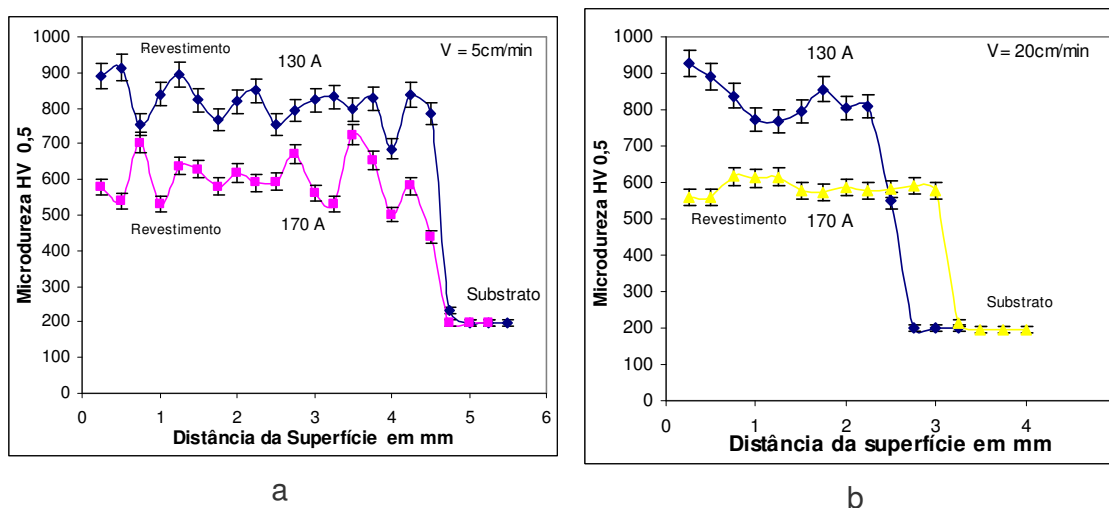


Figura 4.6 – Perfil de microdureza Vickers de revestimentos da Colmonoy 6 por PTA, sobre metal base o aço AISI 1020 a) 130 A e 170A - 5 cm/min; b) 130 A e 170A - 20 cm/min

4.1.2 Microestrutura

A microestrutura dos depósitos processados com a liga Colmonoy 6 é complexa (CROOK, 1992) e depende dos parâmetros de processamento, da velocidade de avanço e intensidade de corrente (DAS, 2003). No presente estudo, os parâmetros velocidade de avanço e intensidade de corrente influenciaram a microestrutura.

A Figura 4.7 apresenta o efeito da intensidade de corrente na microestrutura dos depósitos processados com a menor velocidade de avanço, de 5cm/min. Observam-se fases de morfologias diversas, variando desde dendritas até formas aciculares. De acordo com a literatura, cada uma dessas morfologias corresponde a fases diferentes. Além de solução sólida de Ni que contém Fe, Cr e Si, encontram-se boretos e carbetos. (CROOK, 1992; LIM, 1998). A presença de boretos e carbetos pode ser associada aos picos de dureza medidos na seção transversal dos depósitos.

O aumento da intensidade de corrente resultou em estruturas mais grosseiras, Figura 4.7b, associadas a maior energia fornecida durante a deposição.

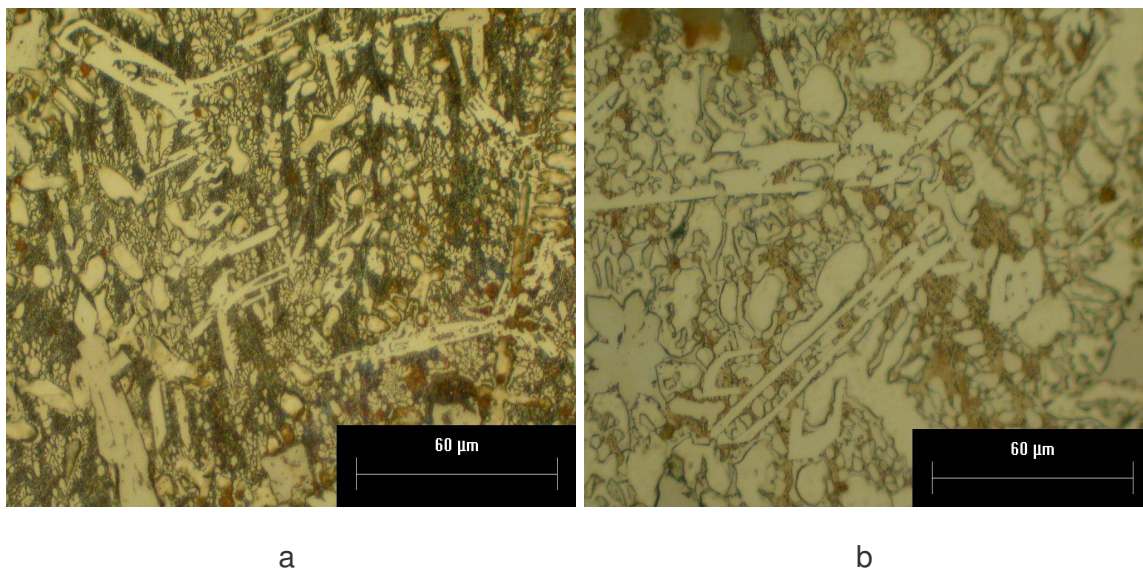


Figura 4.7 – Microestruturas obtidas por microscopia ótica dos depósitos da Colmonoy 6, por PTA, processadas com velocidade de 5 cm/min, tendo com substrato o aço AISI 1020. a) 130A ; b) 170 A. Ataque eletrolítico- HCl e Etanol , 90s.

Os revestimentos processados com velocidade de 5cm/min, para as correntes de 130A e 170A (Figura 4.6a, p.47) apresentaram um perfil irregular de microdureza, o que pode ser associado ao fato de que para menor velocidade uma maior quantidade de boretos e carbeto são dispersos na matriz, devido ao grande volume do revestimento depositado e menor diluição. Além desses fatores, a geometria da seção transversal dos revestimentos processados para a velocidade de 5cm/min, tem área muito maior, em relação aos revestimentos processados com velocidade de 20cm/min, conduzindo a um número de indentações bem superior, aumentando a probabilidade de essas incidirem sobre boretos e carbeto para a menor velocidade.

Alguns detalhes da microestrutura dos revestimentos da Colmonoy 6 podem ser observados na Figura 4.8, para revestimentos processados com corrente de 130A e velocidade de 20cm/min. O ataque feito nessa microestrutura, teve a duração de 25s, por isso não aparecem os precipitados observados na Figura 4.7a e b, que sofreram um ataque com tempo de 90s.

Com base no trabalho de Conde (2002), que analisa as microestruturas dos revestimentos da liga Colmonoy 6 em MEV. Os precipitados uniformemente distribuídos na matriz (Figura 4.8) são basicamente compostos de Cr, com maior percentagem de Cr para precipitados de cor negra e menor percentagem desse elemento, para precipitados de cor cinza, embora, também, seja detectada a presença de Ni e Fe. A matriz em que essas fases estão distribuídas é composta principalmente de Ni, contendo, também, Fe e Cr. Observa-se uma grande variedade de precipitados com diferentes morfologias, distribuídos uniformemente na matriz de Ni, tais como: agulhas (região A, carbeto de cromo), lamelas com peritéticos (região B, carbeto de cromo), cuboidal (região C, carbeto de cromo), globular (região D, carbeto de cromo).

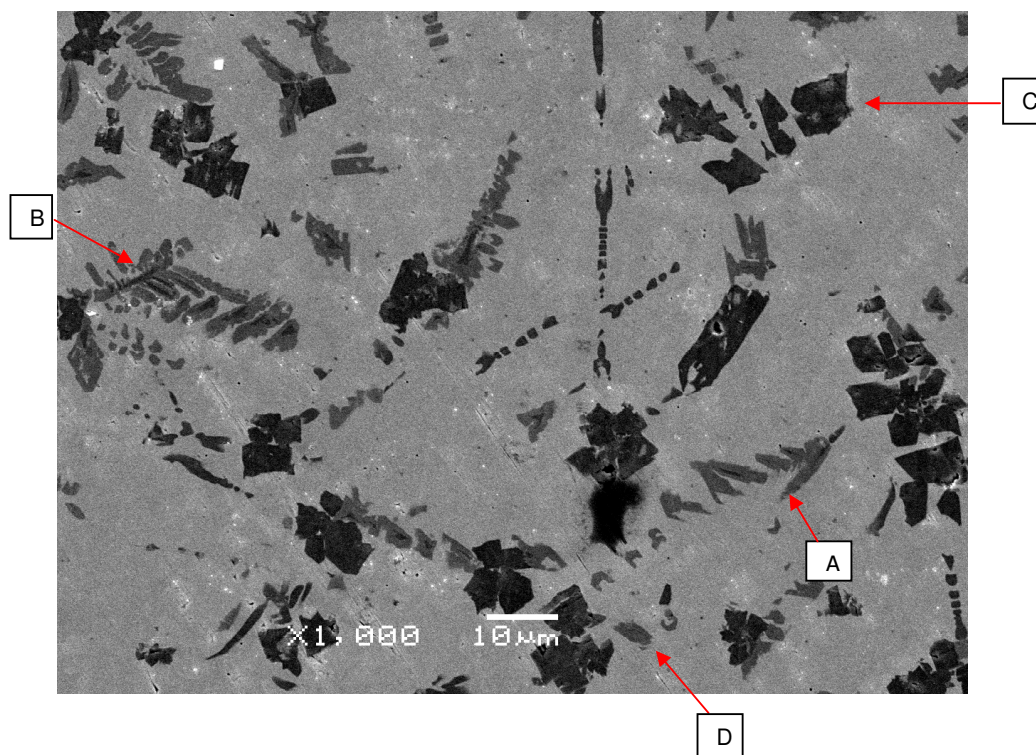


Figura 4.8-Microestruturas obtidas por microscopia eletrônica dos depósitos da Colmonoy 6 por PTA, processadas com velocidade de 20 cm/min e corrente de 130A, tendo como substrato o aço AISI 1020. Ataque eletrolítico - HCl e Etanol, 25s. A) agulhas B) lamelas C) cuboidal e D) globular.

A Figura 4.9 apresenta a difração de raios-X dos revestimentos da Colmonoy 6, depositados sobre o aço AISI 1020, processados com corrente de 130A e velocidade de 20cm/min

4.2 Efeito do Substrato

4.2.1 Características gerais

A qualidade dos cordões processados sobre o substrato o AISI 304 é bastante superior à dos revestimentos processados sobre o AISI 1020, não se observando trincas, descontinuidades ou outros defeitos de processamento. Figura 4.10.

As características gerais dos depósitos processados sobre o AISI 304 seguem tendências similares às apresentadas, após processamento sobre o AISI 1020, quanto à geometria dos cordões. O aumento da corrente de deposição resulta em cordões mais largos e, em consequência, em menores espessuras. Apesar da menor espessura dos depósitos processados sobre o AISI 304, o mesmo aumento da largura do cordão foi observado, em função da redução de velocidade de avanço seguindo tendências já reportadas quando a deposição foi sobre o substrato o aço AISI 1020.

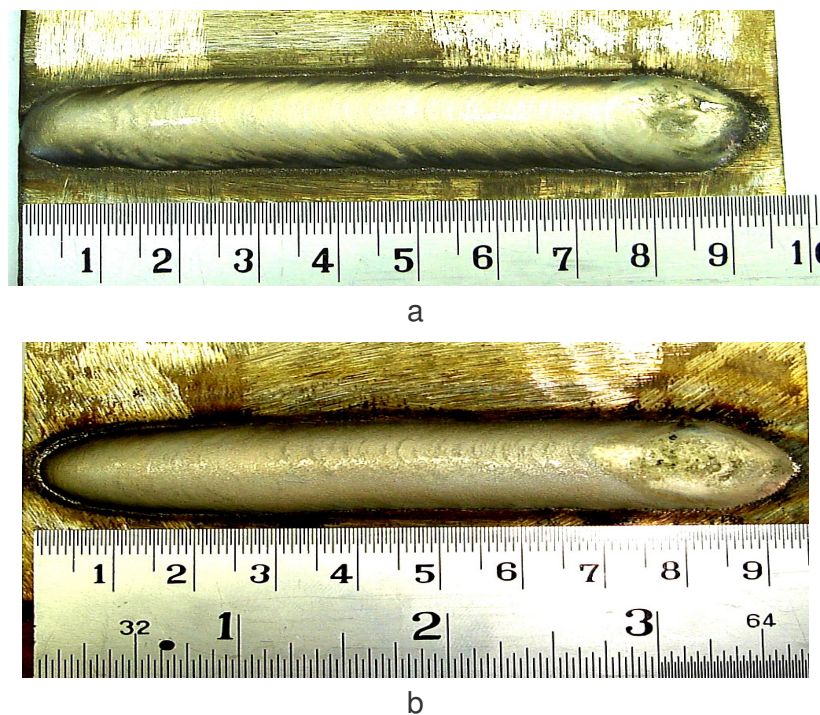


Figura 4.10 – Aspecto do cordão na soldagem por PTA, da liga Colmonoy 6, com velocidade de avanço de 5 cm/min. a) 130 A; b) 170 A. Substrato o aço AISI 304

A Tabela 4.2 apresenta os valores da largura , altura do reforço e penetração dos revestimentos da Colmonoy 6 depositados sobre o substrato o aço AISI 304 em função dos parâmetros de processamento.

Tabela 4.2 – Dimensões dos revestimentos obtidos com a mudança da intensidade de corrente depositados sobre o substrato o AISI 304

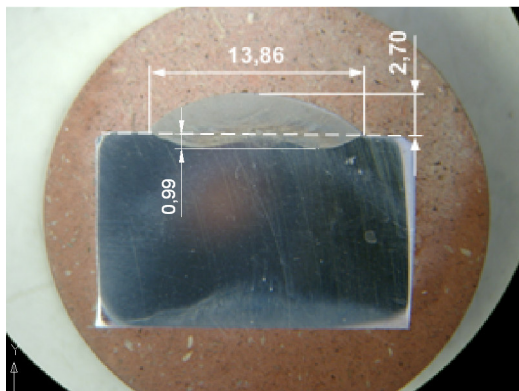
Corrente (A)	Velocidade (cm/min)	Largura (mm)	Altura do reforço (mm)	Penetração
130	5	13,86	2,7	0,99
	20	7,65	1,25	0,73
170	5	16,75	2,39	1,53
	20	8,56	1,22	1,15

Uma diferença importante encontrada nos revestimentos processados sobre o metal de base, o aço inox AISI 304, é sua maior área da zona de fusão em relação aos revestimentos processados sobre o metal de base o AISI 1020. A baixa condutividade térmica do substrato, o AISI 304, faz com que ele absorva mais calor e o mantenha por mais tempo, resultando em aumento da zona de fusão. Isso modifica as características geométricas da seção transversal dos revestimentos processados. Os revestimentos processados sobre o substrato, o inox AISI 304, tem uma menor altura de reforço e menor largura em relação aos revestimentos processados sobre o substrato o AISI 1020, pois um volume maior do revestimento penetra no substrato, devido à sua maior poça de fusão, diminuindo, consequentemente, a altura e a largura do revestimento.

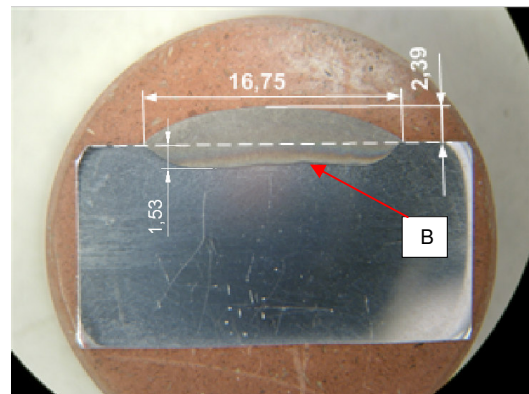
As Figuras 4.11 e 4.12 apresentam a geometria dos revestimentos em corte transversal, sobre o metal de base o AISI 304, processados com correntes de 130 e 170A e velocidades de 5 e 20cm/min. A zona de fusão é indicada através da letra B.

Essas figuras foram utilizadas para se proceder aos cálculos dos valores da diluição. Identificou-se nessas figuras as medidas, em mm, da largura; a altura do reforço e da penetração dos revestimentos da liga. Nessas destacam-se as zonas de fusão para corrente de 170A (indicadas com a letra B).

Revestimentos processados com velocidade de 5cm/min e corrente de 130A, Figura 4.11a, por terem um aporte térmico menor do que os revestimentos processados com a mesma velocidade e corrente de 170A (Figura 4.11b), apresentaram um menor valor na medida da penetração. Do mesmo modo, a Figura 4.12b, que apresenta revestimentos processados com velocidade de 20cm/min e corrente de 170A, mostra uma maior profundidade de penetração em relação aos cordões processados com aporte térmico menor. Figura 4.12a.

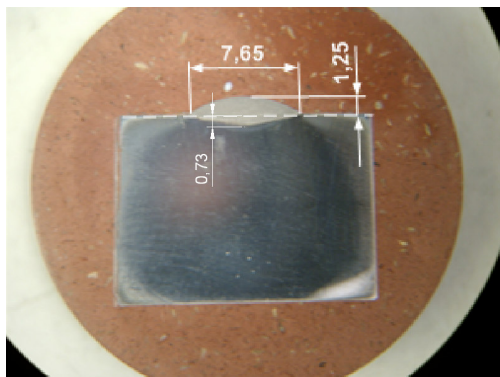


a

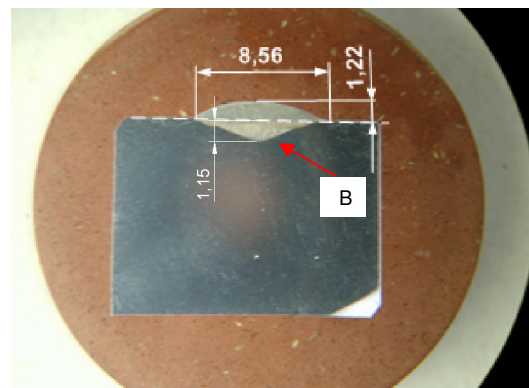


b

Figura 4.11 – Corte transversal dos revestimentos da Colmonoy 6 por PTA, depositados sobre o metal base o AISI 304 processados com velocidade de 5 cm/min. a) 130 A; b) 170 A. Medidas em mm.



a



b

Figura 4.12 – Corte transversal dos revestimentos da Colmonoy 6 por PTA, depositados sobre o metal base o AISI 304 processados com velocidade de 20 cm/min. a) 130 A; b) 170 A. Medidas em mm.

A Figura 4.13 apresenta os valores das diluições dos revestimentos da liga Colmonoy 6, quando depositados sobre o AISI 304. A influência do substrato nos valores da diluição já foi observada em diversos outros trabalhos (SILVÉRIO, 2003; YAEDU, 2002) que confirmam o aumento da diluição, quando os revestimentos são processados sobre o aço inoxidável AISI 304 em relação à medida da diluição em revestimentos processados sobre o aço carbono comum.

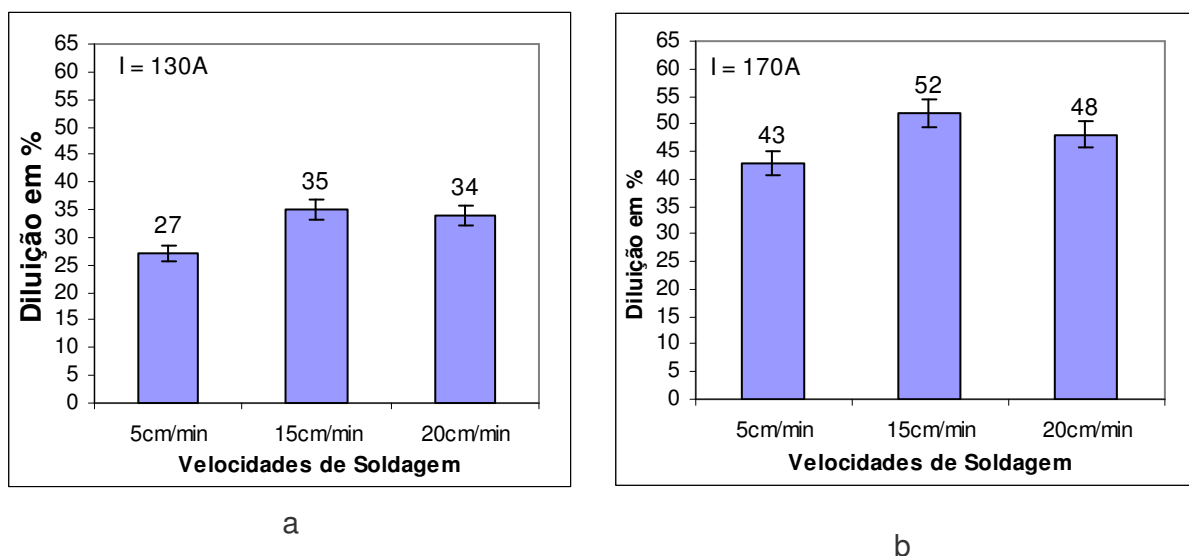


Figura 4.13 – Efeito da corrente nos valores da diluição dos revestimentos da Colmonoy 6 por PTA, depositados sobre substrato de aço o AISI 304. a) 130A e b) 170A, em função da velocidade.

Novamente a tendência de redução da diluição com o aumento da velocidade, foi observada apenas para as maiores velocidades, de 15cm/min e 20cm/min.

Observa-se o mesmo comportamento da diluição em relação à velocidade de deposição, exibida pelos cordões depositados sobre o AISI 1020. A menor velocidade resultou nos menores valores de diluição dos cordões processados com correntes de 130A e 170A.

O efeito da composição química do substrato em relação à velocidade de avanço sobre a diluição para os dois substratos testados está apresentado na Figura 4.14.

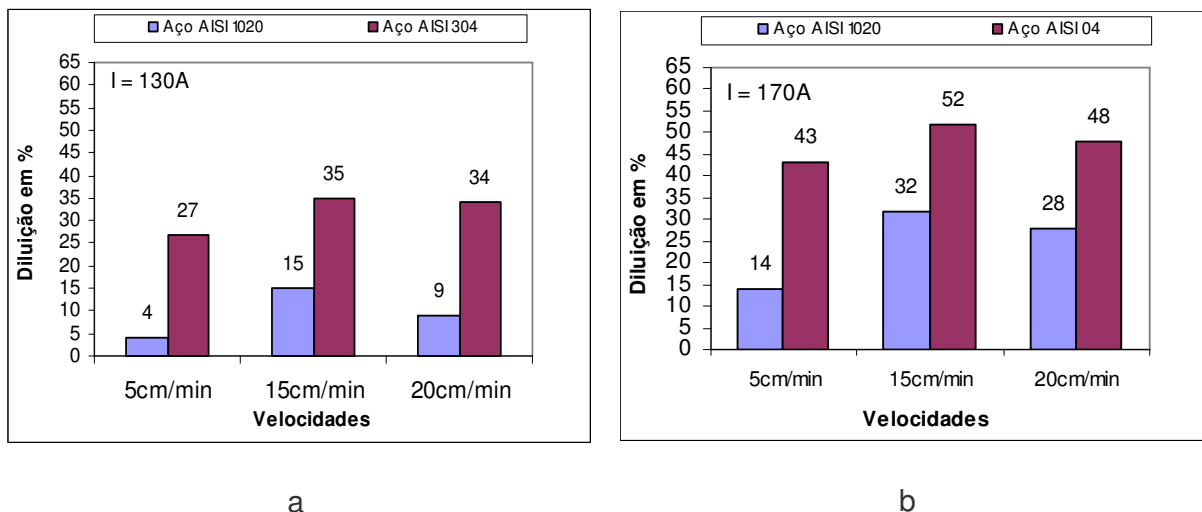


Figura 4.14 – Valores da Diluição para as correntes de 130A e 170A, dos revestimentos da Colmonoy 6 por PTA, com os dois substratos os aços AISI 1020 e aço AISI 304) em função da velocidade.

Verifica-se que, ao se manterem fixos os parâmetros de processamento, valores significativamente menores de diluição foram obtidos nos substratos AISI 1020. A condutividade térmica do inoxidável austenítico é cerca de um terço da do aço carbono, com 112 BTU (www.matweb.com,2008), com grande capacidade de absorver calor, em consequência, um resfriamento mais lento (CARBÓ, 2001) aumentando a poça de fusão, o que conduz a uma maior diluição.

4.2.2 Influência do substrato na dureza

Os valores da dureza dos revestimentos da liga Colmonoy 6, processados sobre o aço inoxidável AISI 304, são significativamente inferiores aos medidos quando a deposição ocorreu sobre o aço carbono (Figura 4.15).

Essa redução da dureza pode ser associada aos maiores valores de diluição e também à menor velocidade de resfriamento, consequência da baixa condutividade térmica do aço inoxidável AISI 304.

A Figura 4.15 mostra os valores comparativos da microdureza dos depósitos da liga Colmonoy 6, sobre os dois metais de base, processados com velocidade de 5cm/min e correntes de 130A e 170A

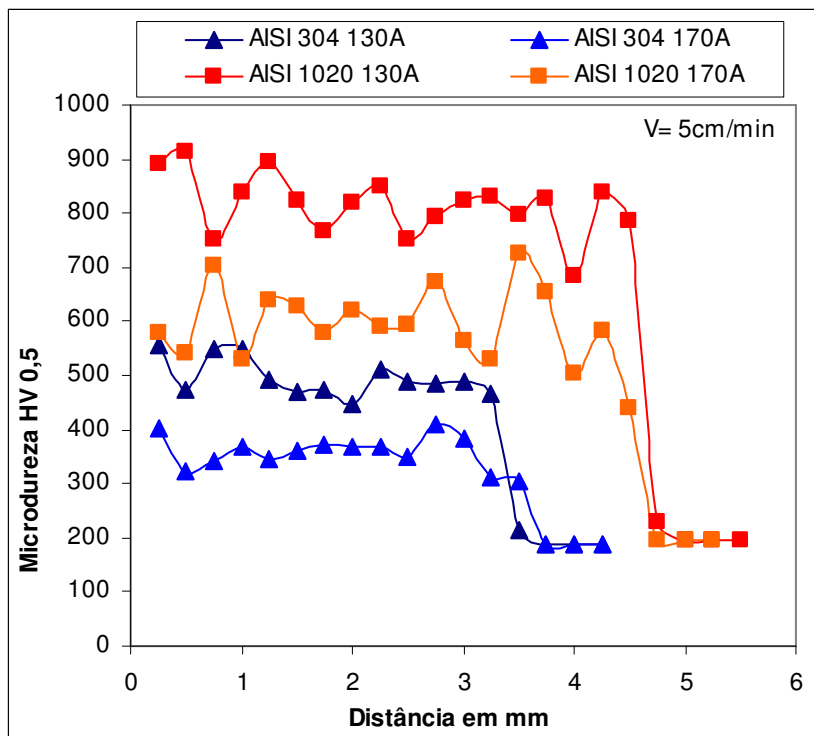


Figura 4.15– Valores de microdureza Vickers dos revestimentos da Colmonoy 6 por PTA, depositados sobre os dois substratos para as correntes de 130A , 170A e velocidade de 5cm/min

A Figura 4.16 apresenta os valores comparativos da microdureza dos depósitos da Colmonoy 6, sobre os dois metais de base, processados com velocidade de 20cm/min e correntes de 130A e 170A. Observa-se que a não uniformidade da dureza na seção transversal dos depósitos processados com a velocidade de 5cm/min sobre o aço carbono AISI 1020 foi praticamente eliminada. Processamentos com a velocidade de 20cm/min resultaram em perfis de dureza uniformes para as duas intensidades de correntes testadas.

Fenômeno similar ocorreu, quando a velocidade de processamento foi 5cm/min, Figura 4.15. Revestimentos da liga de Ni Colmonoy 6 processados sobre o aço 1020, com velocidade de 20cm/min, possuem valores da dureza

significativamente superiores aos medidos em relação aos revestimentos depositados sobre o aço inox, o AISI 304 (Figura 4.16) .

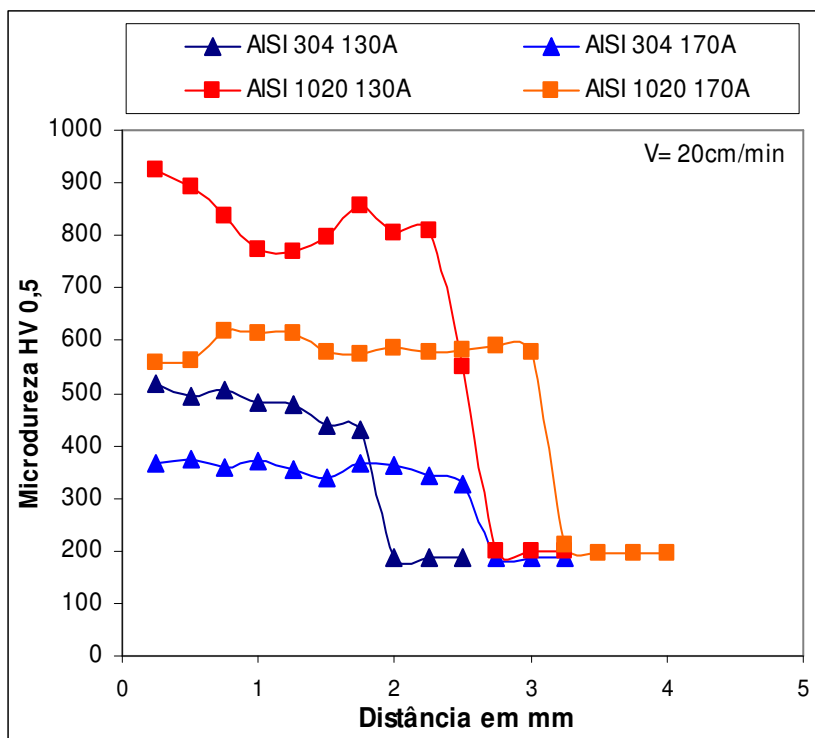


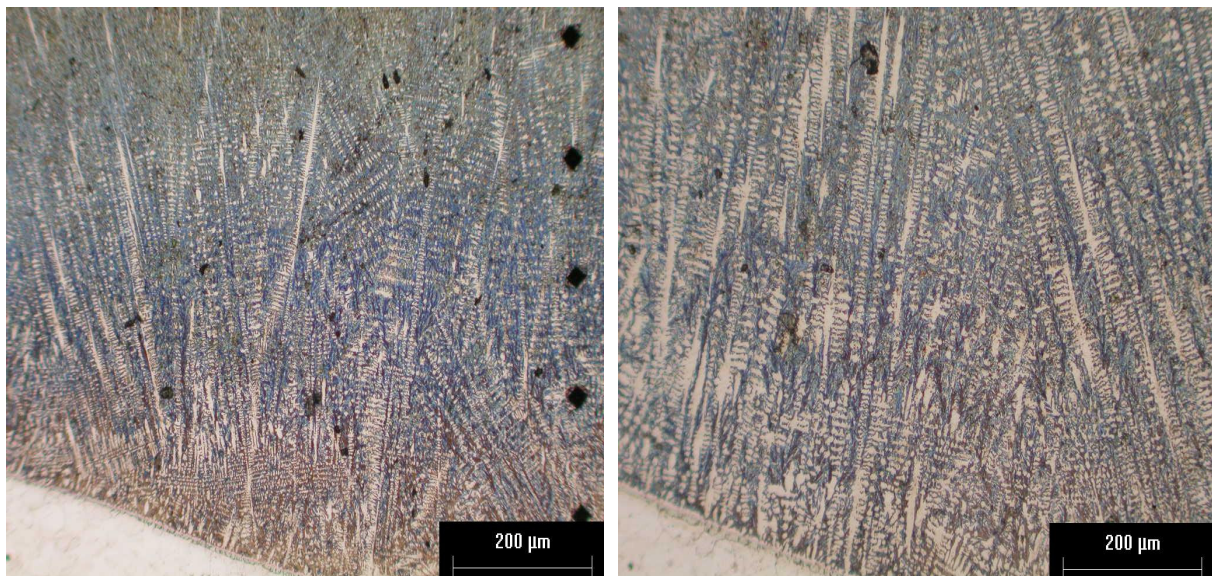
Figura 4.16 – Valores de microdureza Vickers dos revestimentos da Colmonoy 6 por PTA, depositados sobre os dois substratos para as correntes de 130 A , 170A e velocidade de 20cm/min

4.2.3 Influência do substrato na microestrutura

O impacto da composição química do substrato na microestrutura dos revestimentos permite interpretar a queda de dureza medida. Uma estrutura dendrítica sem a presença clara de boretos, silicetos e carbetos dispersos, agindo como partículas endurecedoras pode ser observada na Figura 4.17. Quando os revestimentos foram depositados sobre o AISI 1020, obteve-se a presença de boretos e carbetos dentre outras fases, pois esses precipitados não foram totalmente fundidos na deposição, enquanto para os revestimentos processados sobre o AISI 304 para corrente de 170A, em razão das condições de maior aporte

térmico e menor velocidade de resfriamento, os resultados sugerem que a liga tenha sido totalmente fundida no arco durante a deposição.

Para corrente de 170A, a redução na velocidade de avanço de 20cm/min para 5cm/min resulta em estruturas dendríticas mais grosseiras, resultado esperado pela menor taxa de resfriamento.



a)

b)

Figura 4.17 – Estrutura dendrítica dos revestimentos da Colmonoy 6, depositados no substrato de aço AISI 304. a) corrente de 170 A e Velocidade de 20 cm/min; b) corrente de 170A e velocidade de 5cm/min. Ataque eletrolítico- HCl e Etanol , 15s.

A Figura 4.18 apresenta as microestruturas por microscopia eletrônica dos revestimentos da liga Colmonoy 6, processados com corrente de 130A para as velocidades testadas de 20 e 5cm/min respectivamente.

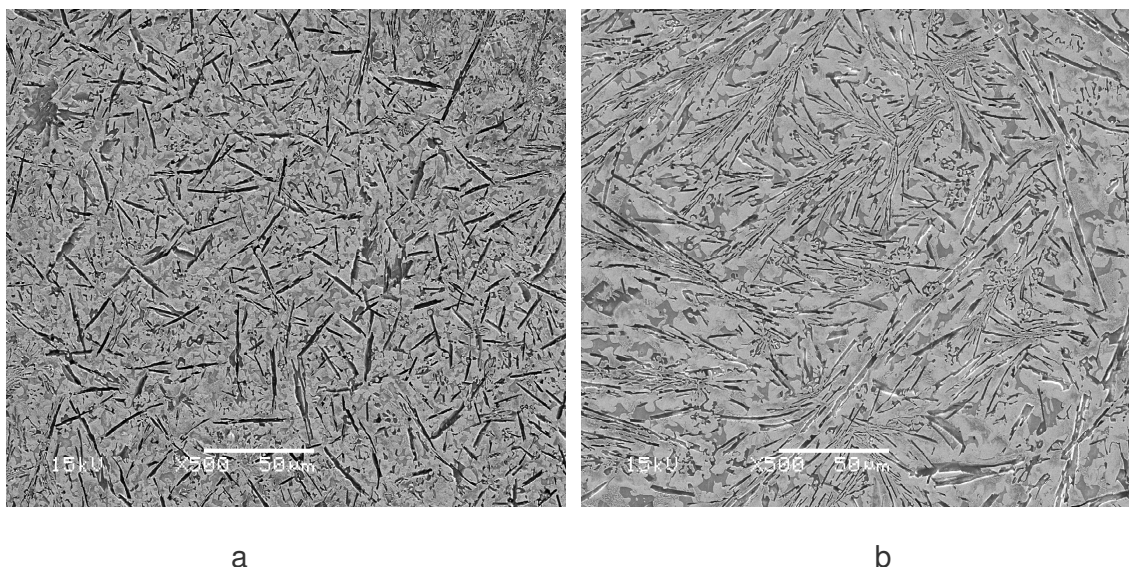


Figura 4.18 – Microestruturas obtidas por microscopia eletrônica, dos revestimentos da Colmonoy 6, processados para corrente de 130A, substrato o aço AISI 304. a) Velocidade de 20 cm/min; b) velocidade de 5cm/min. Ataque eletrolítico- HCl e Etanol , 10s.

A Figura 4.18a apresenta uma maior densidade de partículas em forma acicular, enquanto a Figura 4.18b, além de formas aciculares, apresenta diferentes fases, em relação à Figura 4.18a, em decorrência do maior volume de revestimento depositado.

A Figura 4.19 apresenta a difração de raios-X dos revestimentos da liga Colmonoy 6 por PTA, processados sobre o metal de base o aço AISI 304, com corrente de 130A e velocidade de 20cm/min. Observa-se apenas uma forma de boreto de Ni (Ni_3B), três tipos de carbeto de cromo (Cr_3C_2 , Cr_7C_3 e Cr_{23}C_6) e solução sólida de Ni e solução sólida de Ni com ferro e o siliceto o Ni_3Si . O carbeto de cromo o Cr_3C_2 só foi observado no presente trabalho, para depósitos processados com corrente de 130A e velocidade de 20cm/min. Esse mesmo tipo de precipitado, além do Cr_7C_3 , foi observado também por (SUDHA, 2008).

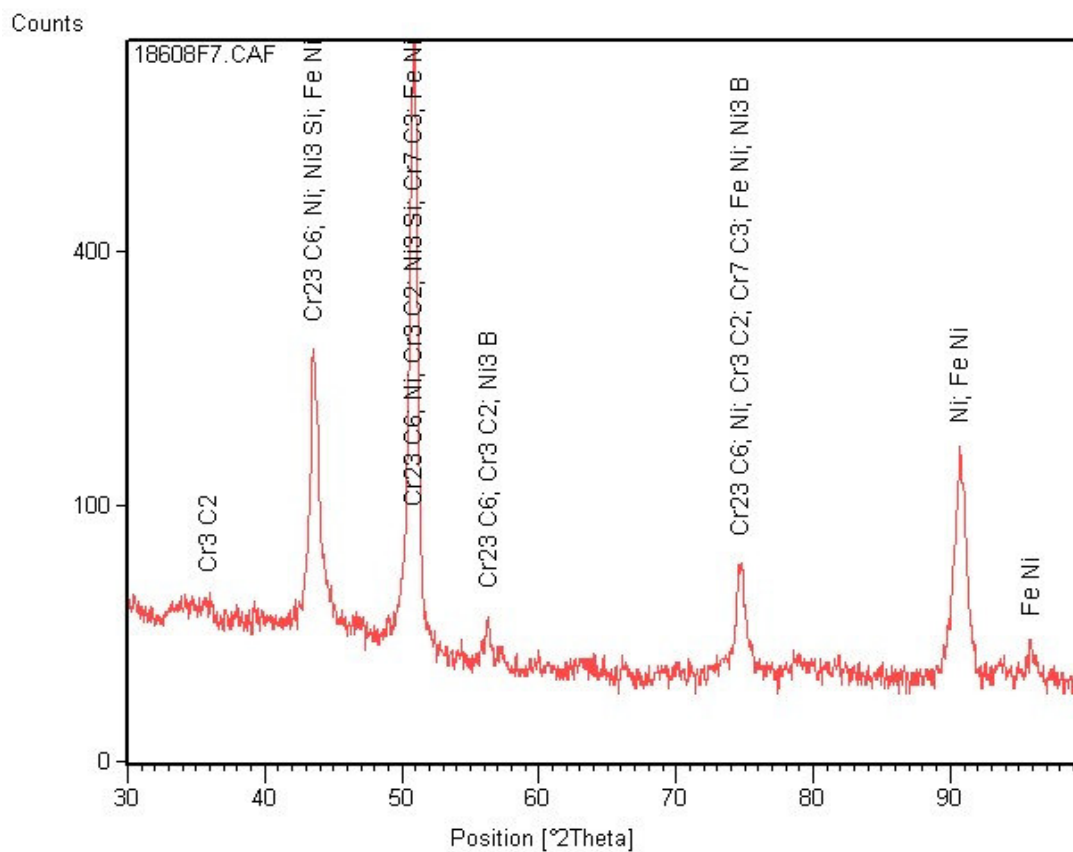


Figura 4.19 – Difração de raios-X dos revestimentos da Colmonoy 6 por PTA com corrente de 130A e velocidade de 20cm/min, substrato o AISI 304.

A Figura 4.20 apresenta a difração de raios-X dos revestimentos da liga Colmonoy 6 por PTA, processados sobre o substrato de aço inox o AISI 304, com corrente de 130A e velocidade de 5cm/min.

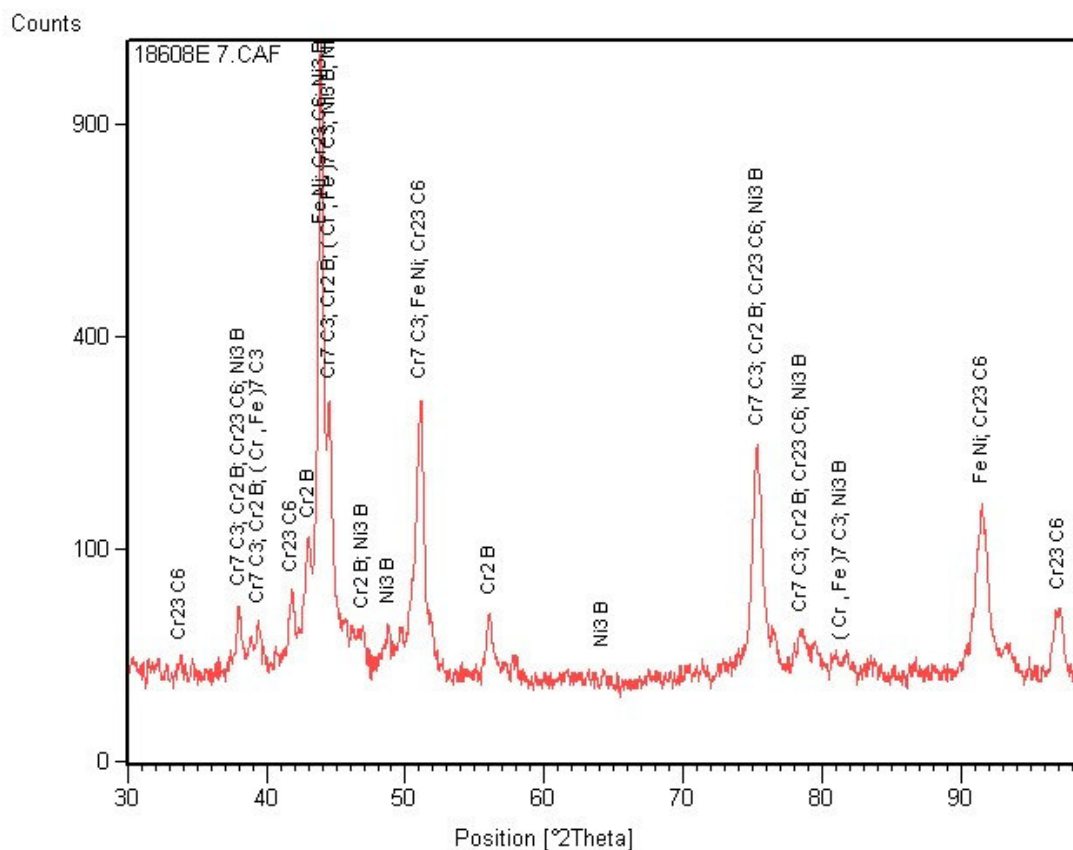


Figura 4.20 – Difração de raios-X dos revestimentos da Colmonoy 6 por PTA com corrente de 130A e velocidade de 5cm/min, substrato o AISI 304.

A difração de raios-X dos revestimentos processados sobre o metal de base, o AISI 304, com corrente de 130A e velocidade de 20cm/min(Figura 4.19, p.60), apresenta algumas fases diferentes quando comparadas à difração dos revestimentos processados com a mesma corrente e velocidade de 5cm/min (Figura 4.20). Depósitos processados com a menor velocidade apresentam alguns precipitados diferentes, como o boreto de cromo (Cr_2B) e o carbeto de cromo que também contém ferro $(\text{Cr, Fe})_7\text{C}_3$; entretanto não apresentam o carbeto de cromo (Cr_3C_2) e o siliceto Ni_3Si que são observados na difração para os revestimentos processados com a velocidade de 20cm/min.

A Figura 4.21 apresenta a estrutura dendrítica dos revestimentos da Colmonoy 6, por microscopia eletrônica, processada com corrente de 170A e

velocidade de 20cm/min. Revestimentos processados com corrente de 170A têm um maior aporte térmico e maior diluição em relação aos revestimentos processados com corrente de 130A e, por isso, uma maior quantidade de calor é absorvido pelas partículas de pó e pelo substrato e, também, por causa de sua superior diluição, não se observam os precipitados apresentados nas figuras 4.18a e b (p. 59).

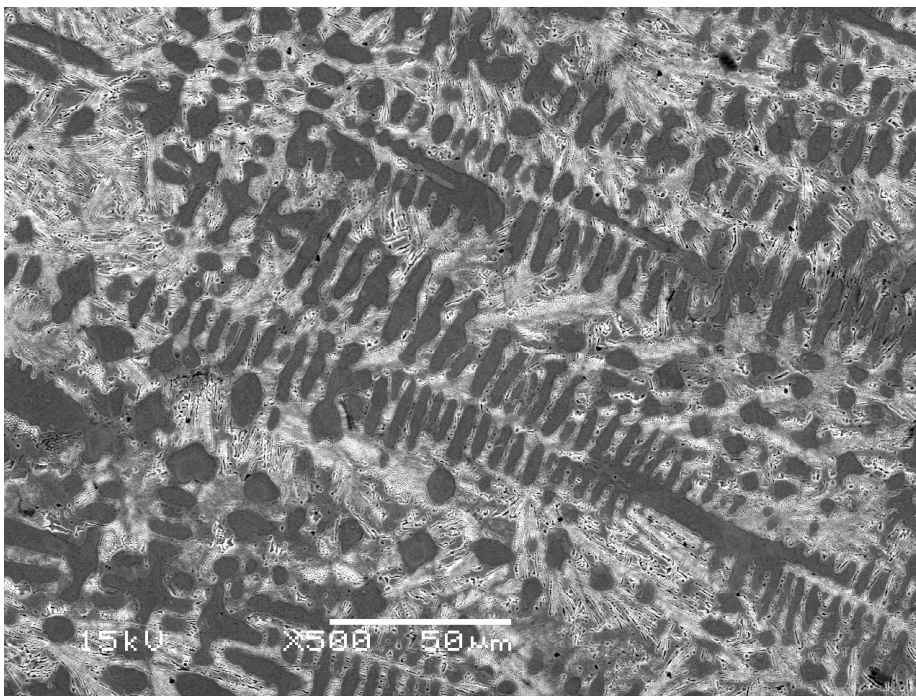


Figura 4.21 – Estrutura dendrítica do revestimento da Colmonoy 6 por microscopia eletrônica, substrato o AISI 304, processado com corrente de 170A e velocidade de 20cm/min. Ataque eletrolítico- HCl e Etanol , 10s.

Embora a microestrutura da Figura 4.21 não apresente claramente carbeto e boreto, a difração de raios-x comprova sua presença.

A Figura 4.22 apresenta a difração de raios-X dos revestimentos da liga Colmonoy 6 por PTA, processados sobre o substrato de aço inox AISI 304, com corrente de 170A e velocidade de 20cm/min. Observa-se que aparece apenas uma forma de boreto de cromo (CrB), uma forma de carbeto de cromo (Cr_{23}C_6) e solução sólida de Ni e Solução sólida de Ni que contém ferro.

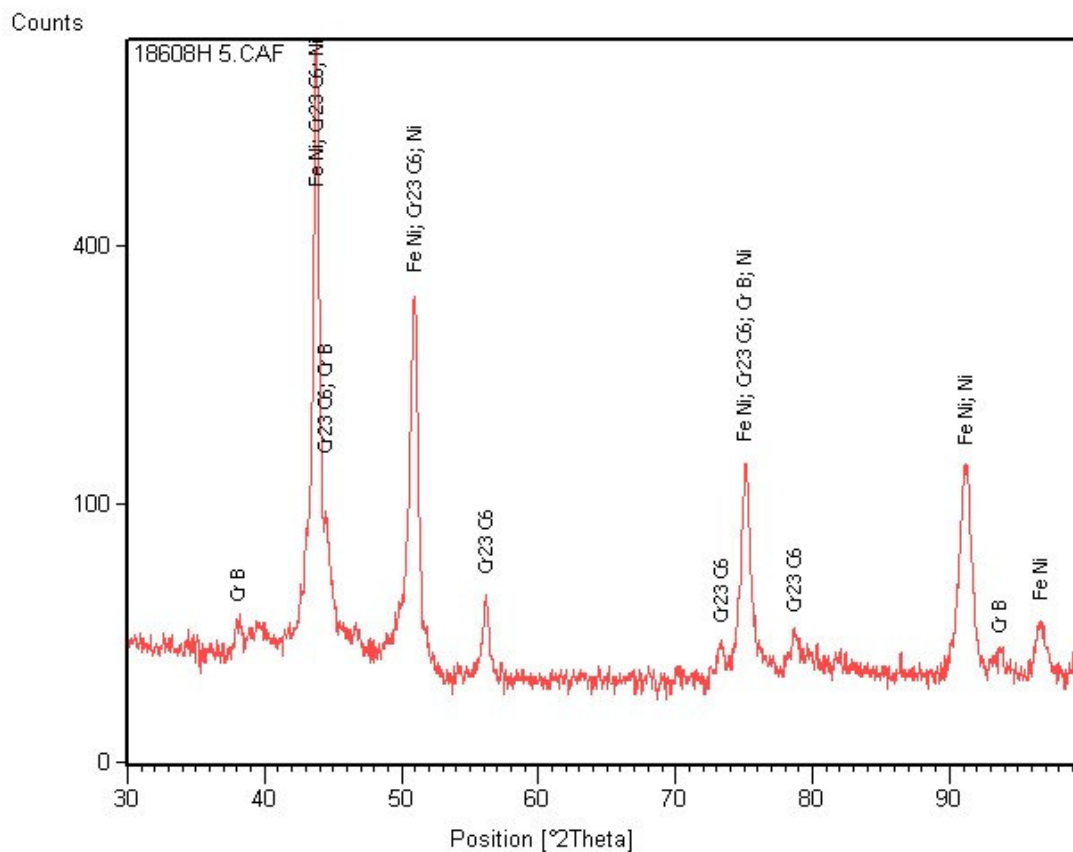


Figura 4.22 – Difração de raios-X dos revestimentos da Colmonoy 6 por PTA com corrente de 170A e velocidade de 20cm/min, substrato o AISI 304.

A Figura 4.23 apresenta a difração de raios-X dos revestimentos da liga Colmonoy 6 por PTA, processados sobre o substrato de aço inox o AISI 304, com corrente de 170A e velocidade de 5cm/min.

Verifica-se a presença de carbetos, boretos e silicetos, fases não identificadas, na análise da microestrutura por microscopia ótica e eletrônica, apresentadas nas Figuras 4.17b e 4.21.

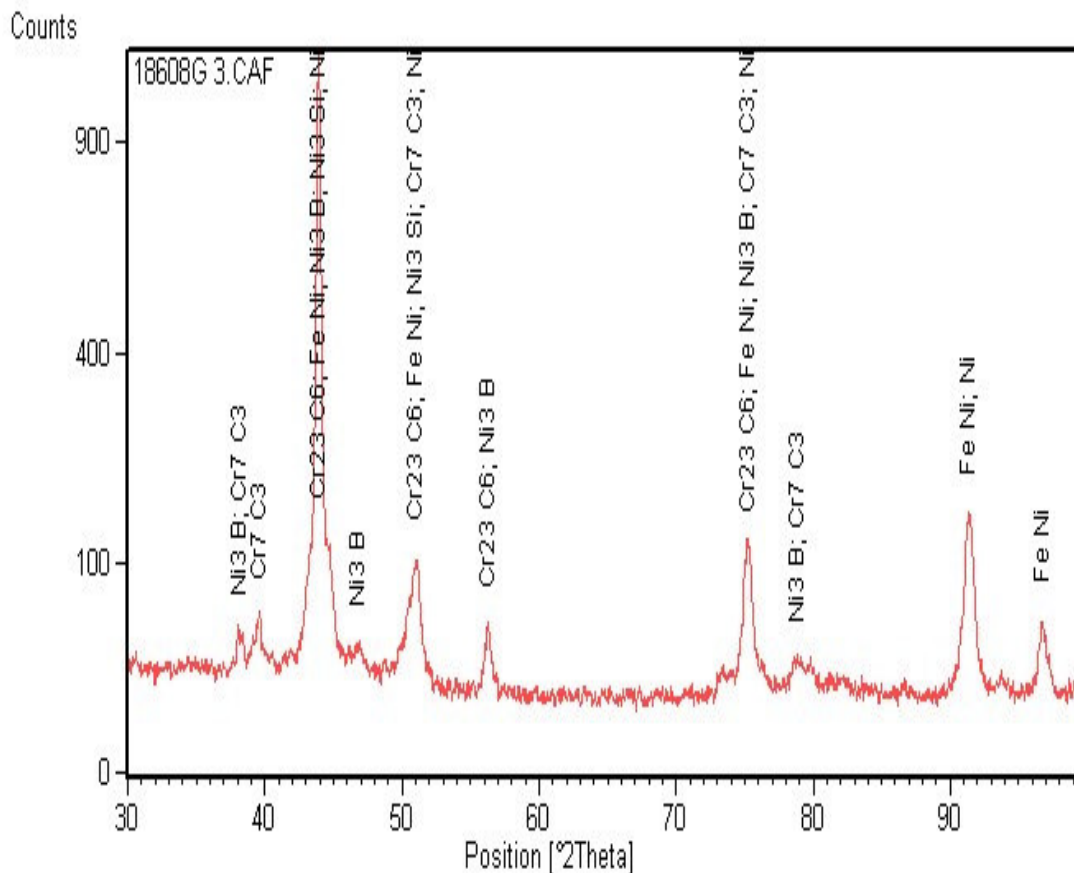


Figura 4.23 – Difração de raios-X dos revestimentos da Colmonoy 6 por PTA com corrente de 170A e velocidade de 5cm/min, substrato o AISI 304.

A difração de raios-X dos revestimentos processados sobre o AISI 304 com corrente de 170A e velocidade de 20cm/min (Figura 4.22, p. 63) apresenta algumas diferenças em relação à difração com revestimentos processados com a mesma corrente e velocidade de 5cm/min (Figura 4.23), tais como: depósitos processados com menor velocidade apresentando as seguintes fases distintas: o carbeto Cr_7C_3 e o siliceto Ni_3Si (enquanto a difração da Figura 4.22 não mostra esses precipitados) e o boreto é o Ni_3B , ao invés do CrB . As soluções sólidas são as mesmas.

4.3 Desempenho ao Desgaste

4.3.1 Influência dos parâmetros de processamento e efeito do substrato no desempenho ao desgaste

O desgaste abrasivo pode ser reduzido pela utilização de materiais reforçados com partículas duras, que permitem interromper os mecanismos de microcorte e microsulcamento das partículas abrasivas. O aumento da resistência ao desgaste abrasivo é função de fatores, como: afinidade com a matriz, distribuição, tamanho e dureza das partículas de segunda fase. (ZUM GAHR, 1987). Como apresentado anteriormente, a microestrutura dos revestimentos da liga de Ni Colmonoy 6 foi determinada pelos parâmetros de processamento e pela composição química do substrato utilizado, obtendo-se maiores quantidades de reforços por partículas de segunda fase de maior dureza, quando o substrato foi o aço carbono.

A Tabela 4.3 apresenta os valores da dureza e perda de massa dos revestimentos da Colmonoy 6 para diversos parâmetros de processamento, testados até uma distância de deslizamento de 5000m. Os revestimentos depositados sobre o substrato o AISI 304 com corrente de 170A e velocidades de 5 e 20cm/min, não completaram o percurso total do ensaio de desgaste por deslizamento abrasivo, pois o revestimento foi “consumido” para distâncias de 2000m e 500m, respectivamente.

Tabela 4.3 – Valores da perda de massa e dureza dos revestimentos da Colmonoy 6, como substrato o AISI 1020 e o AISI 304.

	Corrente (A)	Velocidade (cm/min)	Dureza (HV 0,5)	Perda de massa(g)
AISI 1020	130	5	801	0,02
		20	785	0,04
	170	5	593	0,14
		20	557	0,29
AISI 304	130	5	496	0,13
		20	478	0,22
	170	5	357	x
		20	356	x

Os dados apresentados mostram que, para um mesmo substrato existe uma relação direta entre a dureza e a resistência ao desgaste, medida pela perda de massa. Quando se considera a dureza, independente das características específicas do revestimento, compromete-se a relação entre dureza e perda de massa. Observa-se que essa relação é válida somente para cada um dos sistemas processados (Colmonoy6/AISI 1020 e Colmonoy 6/AISI 304). Isso sugere a influência dos elementos de liga presentes no metal de base, o aço inox AISI 304, principalmente pela presença de cromo e níquel. Verifica-se, assim, que a relação de proporcionalidade direta entre dureza e perda de massa é válida somente quando se comparam desempenhos do mesmo sistema de materiais (liga depositada e substrato). Nessas condições é aplicável a equação de Archard (eq.2.3) que descreve uma relação inversamente proporcional entre dureza e perda de massa. (KALISH 1987).

A Tabela 4.4 apresenta os valores da taxa de desgaste dos revestimentos da Colmonoy 6, para os substratos o AISI 1020 e AISI 304.

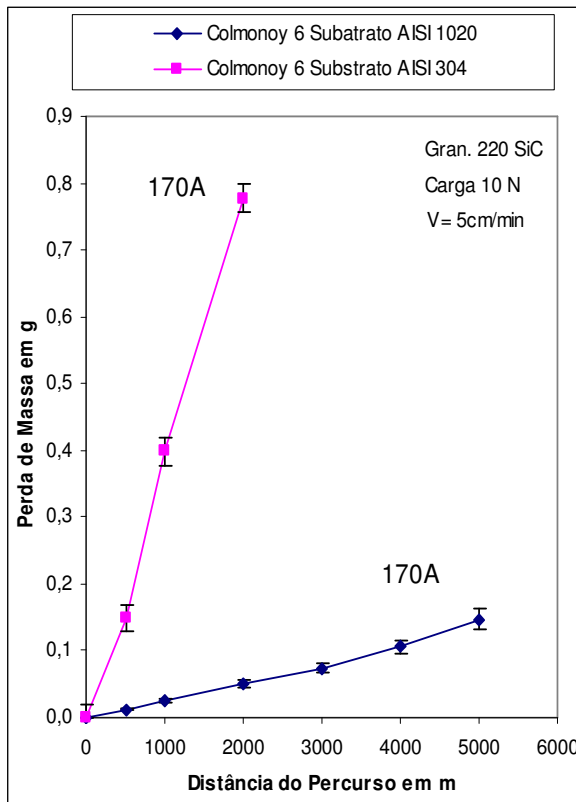
Tabela 4.4 – Valores da taxa de desgaste dos revestimentos da Colmonoy 6, como substrato o AISI 1020 e o AISI 304.

	Corrente(A)	Velocidade (cm/min)	Taxa de Desgaste g/m
AISI 1020	130	5	4E-06
		20	8E-06
	170	5	28E-06
		20	58E-06
AISI 304	130	5	26E-06
		20	44E-06

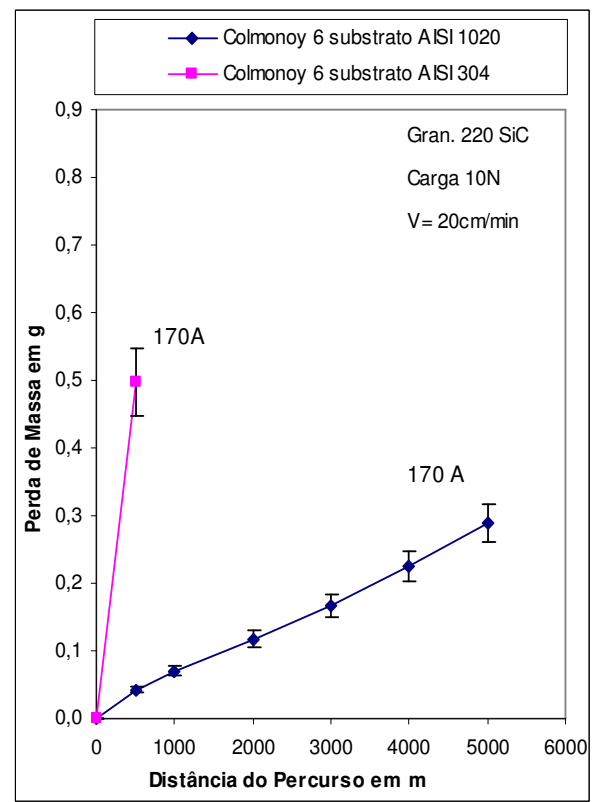
A perda de massa em função da distância está apresentada nas Figuras 4.24 e 4.25 para os revestimentos processados sobre o aço carbono AISI 1020 e o aço inox o AISI 304.

Para cada um desses sistemas de materiais, observa-se que o parâmetro determinante na variação da perda de massa com a distância percorrida foi a intensidade de corrente. A menor intensidade de corrente utilizada (130A) resultou em menores taxas de desgaste. Para os revestimentos que permitiram realizar o teste até uma distância de 5000m, verifica-se que a menor velocidade utilizada, 5cm/min, resultou em menores taxas de desgaste, comportamento associado à maior espessura desses revestimentos e à menor diluição.

A reduzida espessura dos revestimentos processados com 170A e a velocidade de 20 cm/min sobre o aço o AISI 304, somados à maior diluição, menor dureza e microestrutura com menor quantidade de partículas duras, Figura 4.24, justificam a elevada taxa de desgaste exibida por esse depósito. Nesses testes, o revestimento foi “consumido” antes da distância de 5000m, o ensaio foi interrompido, demonstrando menor resistência ao desgaste por deslizamento abrasivo.



a



b

Figura 4.24 – Perda de massa em gramas, dos revestimentos da Colmonoy 6, substrato o AISI 1020 e AISI 304, para um percurso de 5000m num ensaio de desgaste por deslizamento abrasivo, corrente de 170A.

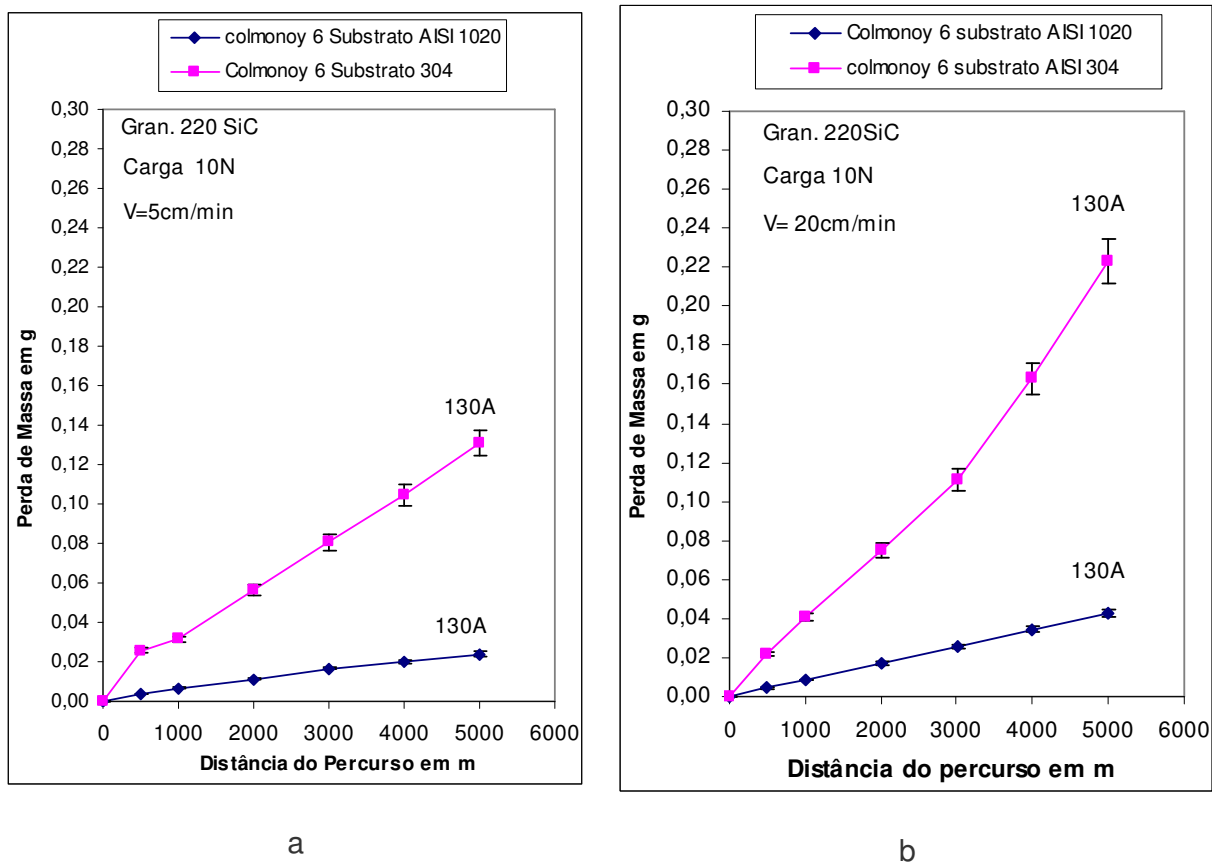


Figura 4.25 – Perda de massa em gramas, dos revestimentos da Colmonoy 6, substrato o AISI 1020 e AISI 304, para um percurso de 5000m num ensaio de desgaste por deslizamento abrasivo, corrente de 130A.

5 CONCLUSÕES

5.1 Conclusões

Para as condições estudadas neste trabalho sobre o efeito dos parâmetros de processamento, composição do substrato e desempenho ao desgaste, pode-se concluir:

1 - A dureza dos revestimentos foi determinada principalmente pela intensidade de corrente. Menor intensidade de corrente resultou em maiores valores de dureza e diluição.

2 - Para cada uma das intensidades de correntes utilizadas, a velocidade de avanço determina o desenvolvimento da microestrutura e, em consequência, as propriedades do revestimento. Baixa velocidade preservou melhor a microestrutura devido à grande quantidade de revestimento depositado.

3 - Para as mesmas condições de processamento, deposição em substrato de aço inoxidável AISI 304 resultou em revestimentos com menor dureza do que quando o substrato foi o aço AISI 1020, associada a uma maior diluição e dissolução de fases duras de carbeto e boretos, comportamento atribuído à baixa condutividade térmica do aço AISI 304.

4 - O desempenho ao desgaste foi determinado pela espessura e dureza dos revestimentos, que é consequência dos parâmetros de processamento. Depósitos processados com a menor intensidade de corrente (130A) e menor velocidade (5cm/min) resultaram em menor perda de massa em cada um dos sistemas revestimento/substrato avaliados. Para o mesmo nível de dureza, depósitos processados sobre o AISI 304 apresentam desempenho ao desgaste por deslizamento abrasivo superior, associado a composição química do substrato que permite preservar as características originais da liga depositada.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

- Depositar a liga Colmonoy 6, tendo como metal base o aço AISI 1020, com preaquecimento para se evitem as trincas e estudar as modificações que ocorrerão. Sabendo-se que o material depositado terá um menor perfil de microdureza e uma estrutura menos refinada, pois o resfriamento será mais lento e estudar a influência desses fatores na resistência ao desgaste por deslizamento abrasivo.

- Depositar a liga sobre os dois metais de base: aço AISI 1020 e aço AISI 304 e submetê-los a temperaturas elevadas, até 800°C. com os mesmos parâmetros desse trabalho, utilizando-se as mesmas técnicas de caracterização dos revestimentos e verificar a mudança da microestrutura, dos valores de dureza e avaliar a sua influência na resistência ao desgaste abrasivo.

- Otimizar os parâmetros de processamento, como por exemplo, a utilização de intensidades de correntes menores do que as do presente trabalho, para que resultem em menores valores da diluição e do aporte térmico, buscando-se minimizar os efeitos da condutividade térmica quando o substrato for o aço inox o AISI 304. Com os mesmos parâmetros de processamento e com as mesmas técnicas de caracterização dos revestimentos, utilizados neste trabalho, verificar a mudança da microestrutura, os valores de dureza e avaliar a influência desses fatores na resistência ao desgaste abrasivo.

- Para minimizar os efeitos da condutividade térmica do substrato, o aço inoxidável o AISI 304, pode-se depositar duas ou mais camadas de revestimento, para diminuir os valores de diluição e em consequência preservar melhor as características da liga. Entretanto este procedimento eleva o custo.

REFERÊNCIAS

ASPHAHANI, A.I. **Corrosion of nickel-base alloys**, ASM Handbook Corrosion, Vol. 13, 10th Edition, ASM Metals Park, Ohio, 1993. p. 641-657.

BRACARENSE, A.Q. **Soldagem a PAW**, apostila do Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica - UFMG, 2000.

BROOKS, C.R.; Heat treatment, structure and properties of nonferrous alloys. ASM, Metals Park, Ohio, USA, 1982. p. 139 – 227.

CARBÓ, H.M. Aços inoxidáveis : **Características básicas, resistência à corrosão e acabamentos**. Apostila , ACESITA, 2001.

CONDE, A.; ZUBIRI, F ; DAMBORENEA, J. de. Cladding of Ni-Cr-B-Si coatings a high power diode laser. **Material science and engineering**, 2002. p. 233-238.

CROOK, P.; F. H.N. **Friction and wear of hardfacing alloys**, ASM International Handbook, ASM Handbook, v. 18, 1992. p. 758-765.

DAS, C. R. et. Al. A novel procedure for fabrication of wear-resistantbushes for high-temperature application. **Journal of materials processing technology** 141(2003): 60-66.

DAVIS, J.R. **Surface engineering for corrosion and wear resistance**, ASM International, 2001.

DONACHIE, M.J.; Donachie,S.J. Superalloys - a technical guide, 2nd Edition, chapter 3, 2002.

FISHER, K.; Fundamentals of solidification. **Trans tech publications**, Switzerland, 1986.

GIMENEZ JR., L.; JOAQUIM, R. Material didático, **Soldagem a Plasma**, INFOSOLDA, 2001. Disponível em: <http://www.infosolda.com.br/download/62dpb.pdf>. Acesso: 08.07.2007.

HUTCHINGS, I. M., **Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials**, Metallurgy and Material Science Series, Ed. Edward Arnold, 273 p., 1992.

- KALISH, H. S. **Corrosion of cemented carbides**, in: ASM Handbook, Corrosion, V.13, 9th Edition, 1987. p. 846-858.
- LIM, L.C.; MING, Q.; CHEN, Z.D. Microstructures of laser-clad nickel-based hardfacing alloys. **Surface and coatings technology** 106 (1998): 183–192.
- MACHADO, I. G, **Soldagem e técnicas conexas: processos**, Universidade Federal do Rio grande do Sul.477f. capítulos 2 e 9, 1996.
- MANKINS, W. L.; Lamb, S. **Nickel and Nickel Alloys**. ASM Handbook Properties and Selection: Iron, Steels and High Performance Alloys, Vol. 2, 10th Edition, ASM Metals Park, Ohio, 1993. p. 429-430.
- MARCONI, M. **Il Plasma ad arco – Il processi PTA**, PlasmaTeam, 2002.
- MATWEB. Disponível em: <http://www.matweb.com>. Acesso em 03/02/2008.
- MING, Q.; LIM, L.C.; CHEN, Z.D. Laser cladding of nickel-based hardfacing alloys, *Jornal of Surface coatings technology* 106(1998):174-182.
- NAVAS, C. et al. Abrasive wear behaviour of laser clad and flame sprayed-melted NiCrBSi coatings. **Surface coatings technology** 200(2006):6854-6862
- OLIVEIRA, M. A. **Estudo do processo de soldagem plasma com alimentação automática de arame, visando sua utilização em revestimentos metálicos** Dissertação de Mestrado, UFSC, 2001.
- PAUL, C. P. *et al.* Laser rapid manufacturing of colmonoy-6 components sprayed-melted NiCrBSi coatings. **Optics and lasers in engineering** 44(2006):1096-1109.
- RABINOWICZ, E. Friction and wear of materials, 1995. 336p. 2nd ed. John Willey and Sons, Inc. 1995.
- SILVÉRIO, B. R.; Oliveira, A.S.C.M. Revestimento de ligas de Co por PTA com alimentação de pó e arame, II congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Uberlândia/MG, abril 2003
- SIMS, C.T.; HAGEL, W.C. **The superalloys**, John Wiley & Sons, New York, 1972. p. 1- 565.

SLAMA, C.; ABDELLAOUI, M. Structural Characterization of the Aged inconel 718, **Journal of alloys and compounds**, v. 306, 2000. p. 277 – 284.

STELLITE, Disponível em <http://www.stellite.com>. Acesso em 03/02/2008.

STOLOFF, N.S. **Wrought and P/M superalloys**, ASM Handbook, Vol. 1, 10th Edition, ASM Metals Park, Ohio, 1993. p. 950-994.

SUCHENTRUNK, R.; Saudigl, G.; G. Jonke, D. H.J. Fuesser, Industrial applications for Plasma Processes-Exemples and trends. **Surface and coatings technology** 97 p 1-9, 1997.

SUDHA, C. et al. Micochemical studies in PTA weld overlay of NiCrSiB alloy on AISI 304L stainless steel. **Surfaced and coatings technology** 202(2008):2103-2112.

SVOBODA, J. M.; **Nickel and Nickel Alloys**. ASM Handbook – Casting, Vol. 15, 10th Edition, ASM Metals Park, Ohio, 1993. p. 815-823.

TECHNICAL DATA SHEET, No. Ni.-1.1B, wall colmonoy Cormporation, Madison Heights, MI, USA 1990.

RELA, P.R. Processo de Soldagem com Plasma In. WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H. **Soldagem processos e metalurgia**, Capítulo 2f, 4^a reimpressão 2004.

WU, W.; WU, L. The wear behavior between hardfacing materials. **Metallurgical and materials transactions**: Taiwan, 1996.

YAEDU, A. E.; OLIVEIRA, A. S. C. M.; DA SILVA, P. S. C. P. Influence of dilution on microstructure and mechanical properties of a cobalt-based alloy deposited by Plasma Transferred Arc welding, In: International conference on Advanced Materials, their Processes and Applications, 2002. Materials Week. München,

ZEEMANN, A.; EMYGDIO, O.R.P. Apostila de soldagem, Tecmetal, abril 2001

ZUM GAHR, K.H. **Microstructure and wear of materials**. Tribology Series. v. 13. Elsevier: Amsterdam, 1987.